



João Carlos de Matos
Rodrigues

**Estudo da Influência do Ficheiro STL na Obtenção
de Modelos Tridimensionais**



João Carlos de Matos
Rodrigues

Estudo da Influência do Ficheiro STL na Obtenção de Modelos Tridimensionais

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor Carlos Alberto Moura Relvas, Professor auxiliar convidado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e co-orientação do Doutor António Manuel de Amaral Monteiro Ramos, Professor auxiliar convidado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Dedico este trabalho à minha mãe Leonor, ao meu irmão Luís e, muito saudosamente, ao meu pai Antero.

o júri

Presidente

Prof. Doutor Robertt Angelo Fontes Valente
Professor Auxiliar
Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Arguente

Prof. Doutor Mário Augusto Pires Vaz
Professor Associado
Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Orientador

Prof. Doutor Carlos Alberto Moura Relvas
Professor Auxiliar
Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Co-orientador

Prof. Doutor António Manuel de Amaral Monteiro Ramos
Professor Auxiliar Convidado
Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Ao professor Carlos Relvas, pela orientação neste trabalho, pela compreensão e ajuda prestada.

Ao professor António Ramos, pela co-orientação.

Ao Renato Cabete, da Protosys – Prestação de Serviços de Engenharia, pela disponibilidade em responder sempre à mais pequena dúvida na utilização do equipamento Maxim da Aberlink.

Aos meus amigos, pelo apoio e boa disposição sempre presente ao longo deste trabalho.

À minha família, que ao longo destes anos não deixou de acreditar que era possível concluir esta etapa.

Palavras-chave

Modelação 3D, prototipagem rápida, ficheiro STL, inspecção.

Resumo

A modelação 3D e a prototipagem são ferramentas fundamentais no processo de desenvolvimento de produto, sendo que a transferência de dados entre estas duas ferramentas faz-se frequentemente através de um modelo de triângulos (ficheiro STL). Deste modo torna-se importante determinar os requisitos necessários à geração de ficheiros STL de qualidade, capazes de poderem ser utilizados quer em transferência de dados quer em processos directos de prototipagem.

Keywords

3D modeling, rapid prototyping, STL file, inspection.

Abstract

3D modeling and prototyping area fundamentals tools in product development process, being that the data transfer between this two tools is frequently done through a model of triangles (STL file). Thus it becomes important to determine the requirements for STL file generation of quality, capable of either can be used to transfer data in both direct prototyping processes.

Índice:

1. Introdução	7
2. Estado da arte da modelação e geração de ficheiros STL	8
2.1. A modelação 3D	8
2.2. Tipos de modelação, usos e aplicações	9
2.3. Projecto distribuído, geração e transferência de ficheiros	10
2.4. Formatos de ficheiros nativos e normalizados	11
2.5. Âmbito de utilização dos ficheiros STL	13
2.5.1. Limitações do STL	15
3. Estudo Desenvolvido: Materiais e Métodos	16
3.1. Definição do modelo de estudo	16
3.1.1. Características do modelo (geométricas e dimensionais)	18
3.2. Tecnologias de Prototipagem Rápida Utilizadas	19
3.2.1. Impressão Tridimensional (TDP) (Processo Zprinter)	19
3.2.2. Sinterização Selectiva por Laser (SLS) (Selective Laser Sintering)	20
3.2.3. Maquinagem por Controlo Numérico Computorizado (CNC)	21
3.2.4. Impressão Tridimensional por Extrusão de Plástico (FDM) (processo Dimension)	22
3.2.5. Estereolitografia (SLA) (processo Zprinter)	23
3.3. Geração de ficheiros STL	24
3.4. Obtenção dos Modelos Físicos de Estudo	26
3.4.1. Modelos de Impressão Tridimensional (TDP)	26
3.4.2. Modelos Obtidos pelas Outras Tecnologias	29
3.5. Inspeção e Controlo Geométrico e Dimensional	31
4. Resultados obtidos:	33
4.1. Análise Geométrica	34
4.1.1. Elementos Geométricos Isolados	34

a)	Planeza	34
b)	Cilindricidade	37
c)	Conicidade.....	41
4.1.2.	Elementos Geométricos Associados	43
a)	Perpendicularidade	43
b)	Coaxialidade	45
c)	Paralelismo	47
d)	Localização.....	49
e)	Angularidade	51
4.1.3.	Análise Global das Características Geométricas	53
4.2.	Análise Dimensional.....	56
4.2.1.	Dimensão Linear	56
a)	Dimensão linear dos elementos paralelepípedicos	56
4.2.2.	Dimensão dos Elementos Cilíndricos	58
a)	Cilindros horizontais.....	58
b)	Furos e cilindros verticais	60
c)	Raios ("Filletts")	62
4.2.3.	Dimensão de Ângulos.....	64
a)	Ângulos dos elementos cônicos.....	64
4.2.4.	Análise Global das Características Dimensionais	66
4.2.5.	Dimensão da Forma Complexa (<i>Freeform</i>).....	72
4.3.	Análise global das características geométricas e dimensionais	76
5.	Conclusões.....	79
6.	Referencias Bibliográficas	83

Índice de Figuras:

Figura 1 – Estudo 1 para um modelo de benchmark (Ippolito, <i>et al</i> , 1995).	16
Figura 2 – Estudo 2 para um modelo de benchmark (Campanelli, <i>et al</i> , 2006).	16
Figura 3 – Estudo 3 para um modelo de benchmark (modelo final).	17
Figura 4 – Aspecto do modelo gerado com ficheiro STL fino (F).	25
Figura 5 – Aspecto do modelo gerado com ficheiro STL grosseiro (G).	25
Figura 6 – Aspecto do modelo gerado com ficheiro STL superfino (SF).	25
Figura 7 – Aspecto da impressora 3D utilizada, presente no DEMUA.	26
Figura 8 – Processo de recolha do modelo físico (início).	27
Figura 9 – Processo de recolha do modelo físico (continuação).	28
Figura 10 – Etapa de limpeza do modelo físico.	28
Figura 14 – Equipamento Fresadora Roland	29
Figura 11 – Modelo obtido por SLS.	29
Figura 12 – Equipamento SinterStation 2500 Plus, 3DSystems.	29
Figura 13 – Modelo obtido por CNC.	29
Figura 15 – Modelo obtido por FDM.	30
Figura 16 – Equipamento Dimension 1200es Series da 3D Printers.	30
Figura 17 – Modelo obtido por SLA.	30
Figura 18 – Equipamento Viper Si2 da 3DSystems.	30
Figura 21 – Exemplo de ocorrência de um erro em modo de simulação.	32
Figura 19 – Modelo digital no ambiente de trabalho PowerINSPECT.	32
Figura 20 – Aspecto da CMM utilizada (DEMUA).	32
Figura 22 – Exemplificação do efeito “escada”.	35
Figura 23 – Distinção visual de ficheiros STL (elemento cilíndrico).	37
Figura 24 – Distinção visual de ficheiros STL (elemento cilíndrico “escavado”).	37
Figura 25 – Desvios na superfície complexa para diferentes resoluções.	72
Figura 26 – Desvios na superfície complexa para diferentes direcções de impressão.	73
Figura 27 – Desvios na superfície complexa para diferentes processos.	74

Índice de Tabelas:

Tabela 1 – Características dos ficheiros STL gerados	24
Tabela 2 – Parâmetros de impressão para os modelos obtidos por TDP.	27
Tabela 3 – Valores de planeza, para diferentes resoluções de STL.	34
Tabela 4 – Valores de planeza, para diferentes direcções de impressão.	35
Tabela 5 - Valores de planeza, para diferentes tecnologias.	36
Tabela 6 – Valores de cilindridade, para diferentes resoluções de STL.	38
Tabela 7 - Valores de cilindridade, para diferentes direcções de impressão.	39
Tabela 8 - Valores de cilindridade, para diferentes tecnologias.	40
Tabela 9 – Valores de conicidade, para diferentes resoluções.	41
Tabela 10 – Valores de conicidade, para diferentes direcções de impressão.	41
Tabela 11 - Valores de conicidade, para diferentes tecnologias.	42
Tabela 12 – Valores de perpendicularidade, para diferentes resoluções.	43
Tabela 13 - Valores de perpendicularidade, para diferentes direcções.	44
Tabela 14 - Valores de perpendicularidade, para diferentes tecnologias.	44
Tabela 15 – Valores de coaxilidade, para diferentes resoluções.	45
Tabela 16 - Valores de coaxilidade, para diferentes direcções.	46
Tabela 17 - Valores de coaxilidade, para diferentes tecnologias.	46
Tabela 18 – Valores de paralelismo, para diferentes resoluções.	47
Tabela 19 - Valores de paralelismo, para diferentes direcções.	47
Tabela 20 - Valores de paralelismo, para diferentes tecnologias.	48
Tabela 21 – Indicação da posição de cada furo.	49
Tabela 22 – Valores de localização, para diferentes resoluções.	49
Tabela 23 - Valores de localização, para diferentes direcções.	50
Tabela 24 - Valores de localização, para diferentes tecnologias.	50
Tabela 25 – Valores de angularidade, para diferentes resoluções.	51
Tabela 26 – Valores de angularidade, para diferentes direcções.	51
Tabela 27 - Valores de angularidade, para diferentes tecnologias.	52
Tabela 28 – Análise global das características geométricas, para diferentes resoluções.	53
Tabela 29 – Análise global das características geométricas, para diferentes direcções.	54
Tabela 30 - Análise global das características geométricas, para diferentes tecnologias.	55
Tabela 31 – Valores das distâncias entre planos, para diferentes resoluções.	56
Tabela 32 – Valores das distâncias entre planos, para diferentes direcções.	57
Tabela 33 – Valores das distâncias entre planos, para diferentes tecnologias.	57
Tabela 34 – Valores dos desvios em cilindros horizontais, para diferentes resoluções.	58
Tabela 35 - Valores dos desvios em cilindros horizontais, para diferentes direcções.	59
Tabela 36 - Valores dos desvios em cilindros horizontais, para diferentes tecnologias.	59
Tabela 37 - Valores dos desvios em furos e cilindros verticais, para diferentes resoluções.	60

Tabela 38 - Valores dos desvios em furos e cilindros verticais, para diferentes direcções.	61
Tabela 39 - Valores dos desvios em furos e cilindros verticais, para diferentes tecnologias.	61
Tabela 40 – Valores dos desvios em raios, para diferentes resoluções.	62
Tabela 41 – Valores dos desvios em raios, para diferentes direcções.	62
Tabela 42 – Valores dos desvios em raios, para diferentes tecnologias.	63
Tabela 43 – Desvios angulares nos elementos cónicos, para diferentes resoluções.	64
Tabela 44 – Desvios angulares nos elementos cónicos, para diferentes direcções.	64
Tabela 45 – Desvios angulares nos elementos cónicos, para diferentes tecnologias.	65
Tabela 46 – Análise global dos desvios dimensionais, para diferentes resoluções.	66
Tabela 47 – Análise global dos desvios dimensionais, para diferentes direcções.	68
Tabela 48 – Análise global dos desvios dimensionais, para diferentes tecnologias.	70
Tabela 49 – Valores dos desvios no <i>Freeform</i> , para diferentes resoluções.	73
Tabela 50 – Valores dos desvios no <i>Freeform</i> , para diferentes direcções.	74
Tabela 51 – Valores dos desvios no <i>Freeform</i> , para diferentes processos.	75
Tabela 52 – Análise global das características geométricas e dimensionais, para diferentes resoluções. ..	76
Tabela 53 – Análise global das características geométricas e dimensionais, para diferentes direcções.	77
Tabela 54 – Análise global das características geométricas e dimensionais, para diferentes tecnologias. .	78

1. Introdução

O presente trabalho insere-se na área temática de Desenvolvimento de Produto, tendo como primeiro objectivo o estudo da influência da resolução do formato STL na obtenção de modelos tridimensionais e determinar os requisitos necessários à geração de ficheiros STL capazes de reproduzir um modelo CAD 3D com uma tolerância previamente estabelecida.

O segundo objectivo foi analisar a influência da orientação da deposição das camadas decorrentes do processo de prototipagem rápida de modo a tentar estabelecer qual a melhor orientação e qual a que apresenta os menores desvios de forma face à topologia do modelo teórico digital.

Finalmente, realizar o estudo comparativo em termos geométricos e dimensionais de algumas das tecnologias de prototipagem rápida mais habitualmente utilizadas, impressão tridimensional (TDP), modelação por extrusão de plástico (FDM), sinterização selectiva por laser (SLS), estereolitografia (SLA) e maquinagem por controlo numérico computadorizado (CNC).

A realização deste trabalho contemplou o aprofundamento dos conhecimentos em processos de prototipagem rápida, de modo mais relevante a tecnologia de impressão 3D, e de técnicas de controlo dimensional. A aquisição de conhecimentos nestas duas áreas fez-se através da utilização de algumas das tecnologias existentes no laboratório de Desenvolvimento de Produto, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, tornando todo o percurso de uma dissertação mais prático e apelativo.

Esta dissertação é constituída por 5 capítulos, sendo que no capítulo 2 é apresentado um breve resumo do estado da arte da modelação e geração de ficheiros STL. O capítulo 3 faz referência aos materiais e métodos utilizados na parte experimental deste trabalho. No capítulo 4, procede-se à análise dos resultados obtidos e por fim, capítulo 5, uma breve conclusão sobre estes mesmos resultados.

2. Estado da arte da modelação e geração de ficheiros STL

2.1. A modelação 3D

A modelação é um processo de representação de formas de objectos (modelos). Os modelos são utilizados para pensar, visualizar, comunicar, prever, controlar, ensaiar, etc., podendo ser descritivos ou previsíveis. Um modelo descritivo representa uma ideia, um produto ou um processo de modo reconhecível, como por exemplo um desenho técnico ou um modelo computacional de um objecto. Estes modelos podem ser usados como formas de comunicação, mas não permitem prever o seu comportamento. Os modelos previsíveis são utilizados para prever e compreender o comportamento de um produto ou sistema.

A modelação é uma actividade que permite criar sistemas mecânicos e desenhos técnicos. Os desenhos poderão ser do tipo bidimensional 2D (ortográficos) ou tridimensional 3D (perspéticos). Os desenhos 2D são extremamente úteis para realizar certo tipo de estudos, como por exemplo de cinemática, de definição de esquemas electrónicos ou configuração de linhas de montagem entre outras aplicações (Simões, 2002).

Os sistemas de CAD 3D (*Computer Aided Design*) são utilizados para auxiliar o desenvolvimento de novos produtos e têm vindo a singrar dentro da maioria das empresas. O que falta ainda é o estabelecimento de metodologias que permitam tornar os modelos gerados alteráveis de forma eficiente. A tecnologia de CAD quando correctamente aproveitada é um factor essencial na criação de novos produtos a preços mais reduzidos e num menor espaço de tempo levando a um melhor rendimento de todo o projecto.

2.2. Tipos de modelação, usos e aplicações

Existem actualmente diversos sistemas de desenho assistido por computador (aplicações de CAD) no mercado. A maioria destes sistemas é baseada em dois tipos de filosofias no que concerne a modelação de objectos: modelação por elementos sólidos e modelação por elementos de superfície. Contudo, existem aplicações de CAD que permitem a modelação utilizando ambas as formas de modelação, estas aplicações são designadas de sistemas de modelação híbrida (Simões, 2002).

Os sistemas de superfícies são capazes de descrever formas complexas e são geralmente usados para definir formas mais estéticas e aerodinâmicas (Jacobs, 1990). Este tipo de modelação apresenta algumas limitações, nomeadamente no que se refere à manipulação de topologia e à maior dificuldade na realização de cálculos de engenharia. Apesar de tudo, a modelação por superfícies também tem inúmeras vantagens e é bastante utilizada hoje em dia. Pode-se dizer que esta modelação consiste em definir o exterior de um sólido através de uma camada infinitamente fina. A maioria dos sistemas de modelação por superfície utiliza curvas *NURBS* (*Non Uniform Rational Basis Spline*) para descrever a superfície de um objecto.

As curvas *NURBS* caracterizam-se por terem um determinado número de pontos de controlo (pólos) em que cada um deles tem um peso específico na manipulação da própria curva, permitindo assim flexibilidade para criar uma grande variedade de formas (Minetto, 2003). As formas cada vez mais arrojadas no desenho de produto criaram novas exigências aos engenheiros, em que a não utilização da modelação através de curvas *NURBS* se tornou praticamente impossível.

A modelação sólida por sua vez é bastante mais limitada no que diz respeito à manipulação de formas complexas, no entanto oferece grande fiabilidade quando existe a necessidade de fazer alterações ao nível da topologia. Este tipo de modelação pode ser definido como uma representação geométrica de um volume delimitado. O volume é representado graficamente, com curvas e superfícies, assim como por uma estrutura topológica em árvore que promove uma relação lógica inerente apenas às superfícies sólidas, que permite definir e manter todas as relações entre cada face e superfície da geometria (Jacobs, 1990). O facto do software armazenar informação topológica do objecto permite que qualquer alteração que seja feita na sua forma, ou na localização e alteração na ordem das funções, tenha repercussões automáticas em todo o objecto.

Ao contrário da modelação por superfícies não existem lacunas entre as faces de um modelo sólido, constituindo assim uma enorme vantagem quando se pretende produzir um modelo físico recorrendo a um qualquer processo de fabrico directo, como a prototipagem rápida ou a maquinagem CNC.

2.3. Projecto distribuído, geração e transferência de ficheiros

A necessidade das empresas lançarem novos produtos em espaços de tempo cada vez mais reduzidos impôs a procura de formas de reduzir o ciclo de desenvolvimento de produto.

O processo de design de engenharia tradicional tem vindo a evoluir de uma actividade linear segmentada para uma actividade em equipa, envolvendo áreas multidisciplinares de projecto. Esta forma de fazer projecto é hoje designada de *Engenharia Simultânea (Concurrent Engineering)* (Simões, 2002).

A alteração dos métodos de trabalho é constante e sempre no sentido da optimização de todos os processos de concepção e produção. Os avanços na tecnologia, a necessidade crescente de softwares mais complexos, o desejo do cliente correr mais riscos e a necessidade das empresas serem mais competitivas no mercado são os principais motivos que levam as equipas de desenvolvimento a apresentarem-se cada vez mais dispersas (Nidiffer, 2005).

Outro fenómeno que se tem observado nos últimos anos é uma cada vez maior globalização da indústria no sentido em que as equipas de trabalho estão espalhadas pelos vários cantos do mundo mas apesar disso trabalham como se fossem uma única equipa apontando esforços para um objectivo comum. Este método é chamado por Projecto Distribuído.

Os projectos distribuídos geograficamente permitem aos gestores de projecto comprimir horários empregando equipas de trabalho maiores do que aquelas que se fixam apenas num local, usando as diferenças horárias de cada zona de maneira a aumentar o número de horas produtivas num dia, e, deste modo, assegurar os escassos recursos de conhecimento que estão espalhados pelo mundo. Contudo, estes benefícios têm riscos acrescidos devido à falta de contacto e comunicação directa com os vários intervenientes podendo levar a uma falta de confiança e colaboração dentro da equipa de trabalho.

Os recursos tecnológicos existentes hoje, podem não ser suficientes para uma comunicação eficiente entre as diferentes partes envolvidas, apesar de todos os dispositivos que existem, a evolução da gestão do projecto distribuído passa também por uma melhoria constante ao nível dos processos, métodos e ferramentas de partilha de dados.

2.4. Formatos de ficheiros nativos e normalizados

A partilha de ficheiros assume, cada vez mais, um papel preponderante na indústria actual. Num projecto, as várias partes envolvidas deveriam ser capazes de transferir ficheiros de CAD entre si sem qualquer limitação ou incompatibilidade. No entanto, não existe nenhum formato padrão, o que leva a que a interligação entre os sistemas CAD e os sistemas de fabrico computadorizados seja uma das grandes preocupações das empresas actualmente.

Um dos objectivos dos fabricantes é o aumento da eficiência na produção através da optimização do processo de desenho e fabrico, nomeadamente no controlo de ficheiros. A diversidade de equipamentos e a heterogeneidade dos softwares de CAD/CAM tem um papel importante na comunicação entre sistemas. Esta dificuldade pode existir, não só numa empresa que tem mais do que um sistema, mas também em empresas com diversos parceiros.

Deste modo torna-se de extrema importância que se possa guardar num ficheiro toda a informação necessária, de forma normalizada, para que esta possa ser utilizada noutras aplicações de CAD ou em processos de prototipagem rápida. A modelação de um objecto pode ser guardada em vários tipos de ficheiros normalizados, para posterior utilização noutro tipo de sistema, e eles podem ser do tipo IGES, STEP, STL, DXF, WRL, entre outros. De facto, a compatibilidade entre modelos criados em diferentes sistemas de CAD é quase total se forem do mesmo tipo (Simões, 2002).

O formato STL (*Stereolithographic Tessellation Language*) é bastante utilizado, uma vez que está disponível em todos os sistemas de CAD 3D e CAM, tornando assim a comunicação mais fácil apesar de alguma imprecisão do modelo. Este formato permite reproduzir um sólido através de um conjunto de triângulos que representam as suas superfícies. Neste formato, entidades como pontos, linhas, curvas e atributos como a cor ou tipo de material são ignorados durante o processo de transformação em formato STL.

O ficheiro STL é uma representação poliédrica de um objecto em faces triangulares. Este é gerado a partir de um modelo CAD utilizando um processo de geração

de mosaicos, que cria triângulos para representar a superfície exterior do modelo CAD. Este tipo de ficheiro pode ser guardado em formato binário ou ASCII. A dimensão do ficheiro STL em ASCII é maior do que em formato binário, mas tem a vantagem de ser legível e poder ser alterado com o auxílio de um editor de texto (*word*).

O formato STL guarda o equivalente a uma lista de faces devidamente numeradas e ordenadas. Cada face é única, sendo identificada por um vector unitário (de comprimento 1), normal ao triângulo, e por 3 vértices. Por cada triângulo, são necessárias 3 coordenadas para definir cada vértice e mais 3 para definir o vector normal. No total temos 12 coordenadas para definir cada face/triângulo. A densidade de triângulos difere consoante a geometria e a precisão exigida da peça (Wah, 1999).

As faces definem uma superfície de um objecto 3D. Assim sendo, cada face faz parte da fronteira entre interior e exterior do objecto.

Para definir a orientação de cada face seguem-se duas regras simples. Primeiro define-se que a normal aponta sempre para o exterior do objecto, e segundo, olhando o objecto pela parte externa, aplica-se a regra da mão direita (sentido anti-horário) para numerar os vértices de cada triângulo.

Cada triângulo deve partilhar 2 vértices com o triângulo adjacente, ou seja, um vértice de um triângulo não pode coincidir com uma face de outro. Assim, sabe-se que para cada objecto o número de faces deve ser par e o número de arestas deve ser múltiplo de 3.

2.5. Âmbito de utilização dos ficheiros STL

Os ficheiros STL também são usados para transferir informação entre sistemas CAD e sistemas de CAM utilizados na programação automática de maquinaria CNC. Este processo permite a maquinaria de uma peça a partir de um modelo digital.

Actualmente os softwares de CAM são capazes de fazer a geração das trajectórias de maquinaria em modelo CAD importados em formato STL levando à diminuição do tempo decorrente entre a geração do código CNC derivado sobre a peça virtual e a geração do mesmo modelo físico. Tem-se assim um método rápido de obter um protótipo, em metal, capaz de ser analisado funcionalmente e solicitado mecanicamente, ao contrário dos típicos protótipos obtidos por prototipagem rápida (PR) que são gerados em materiais poliméricos e apresentam maior aplicação para análise de forma, tamanho e função (in Modern Machine Shop. 1996.).

Pode-se afirmar que a tecnologia de prototipagem rápida (PR) enquadra os processos de fabricação de protótipos por adição sucessiva de camadas, baseados em CAD 3D e onde não existem praticamente restrições em termos da geração de formas, ao contrário do que acontece com a tecnologia CNC.

Em todos os processos de Prototipagem Rápida recorre-se a um modelo CAD 3D que é convertido num ficheiro STL. O ficheiro STL ao ser introduzido no equipamento de Prototipagem Rápida é convertido num ficheiro SLI (na literatura inglesa, “slice”, ou seja fatia), através do software da máquina, que divide o modelo nas várias camadas de construção (Simões, 2004). Este facto origina que as peças obtidas por estes processos apresentem um efeito de escada na superfície. No entanto, dado que o material habitualmente utilizado (ceras, resinas, plásticos, etc...) tem uma dureza reduzida, podem-se atenuar facilmente as irregularidades na superfície das peças obtidas através de operações de acabamento realizadas posteriormente.

A Prototipagem Rápida tem como vantagens a rapidez de execução, a diversidade de materiais disponíveis e o baixo custo de fabricação. Ou seja, em termos gerais, a redução do chamado “time-to-market”, factor de enorme relevância num mercado

fortemente concorrencial como o actual (Simões, 2002). Além disso, ultrapassa-se a necessidade da produção de moldes para executar determinados componentes, que muitas vezes são quase de imediato alterados pelas equipas de design e desenvolvimento, o que obrigaria à execução de novos moldes, com todos os custos inerentes.

A prototipagem rápida, também designada por “Solid Freeform Fabrication” ou por “Layered Manufacturing”, define-se como um conjunto de processos tecnológicos que permitem fabricar modelos físicos tridimensionais directamente a partir de um modelo CAD (Mesquita *et al.*, 1999).

A característica comum do processo de prototipagem rápida reside nos modelos, que são geralmente obtidos por camadas sucessivas. As fatias assemelham-se a secções bidimensionais e são construídas umas sobre as outras de modo a dar forma final ao protótipo. A espessura de cada camada é da ordem da décima de milímetro e a aproximação é considerada aceitável. (Relvas e Simões, 2007).

Os processos de prototipagem rápida permitem realizar peças de elevada complexidade, impossíveis de obter através de meios de fabrico convencionais (Relvas e Simões, 2007).

2.5.1. Limitações do STL

O ficheiro STL é simples e independente do *software* CAD utilizado, pois pode ser lido num simples documento recorrendo a um processador de texto, e sendo um formato normalizado está disponível na grande maioria das aplicações CAD.

No entanto, também apresenta algumas desvantagens. Este formato revela um elevado grau de redundância, devido à duplicação de arestas e vértices (um ponto que seja comum a três triângulos é representado três vezes, por exemplo), e também por, regra geral, exigir muito espaço para armazenamento e recursos elevados para ser processado no computador. Podem também ocorrer erros durante o processo de geração dos triângulos resultando em defeitos, tais como buracos ou fendas, sobreposições de faces e deficiente identificação das normais de cada face. Estes erros ocorrem porque este tipo de formato não verifica a consistência dos dados guardados (Chen, *et al*, 1999). O formato STL não contém qualquer informação relativa à cor e ao material do modelo digital. O ficheiro STL pode conter milhares de triângulos para representar um modelo, ao passo que num formato matematicamente mais preciso, apenas algumas superfícies são suficientes para representar o mesmo modelo. Este factor torna-se mais relevante quando se trata de criar modelos digitais 3D com formas irregulares, tais como formas anatómicas (Yao, 2005).

Quando são exigidos protótipos com grande fidelidade ao modelo físico original, torna-se necessário aumentar a resolução do ficheiro STL. Quanto maior a resolução do ficheiro melhor é a aproximação feita à superfície em causa. No entanto, o aumento do número de superfícies potencia o risco de sobreposição de faces. Além disso, uma grande resolução implica um aumento no tamanho do ficheiro que poderá dificultar a sua transferência. Um ficheiro deste tipo, de grande resolução, pode ocupar facilmente o dobro do tamanho que ocuparia quando representado no seu formato nativo.

3. Estudo Desenvolvido: Materiais e Métodos

3.1. Definição do modelo de estudo

Para realizar o trabalho proposto era necessário definir um, ou vários, objectos de estudo. O modelo usado como meio de comparação, ou *benchmark*, foi construído de modo a permitir a inspecção do maior número de características geométricas e dimensionais num volume reduzido. Durante o processo de idealização e modelação do modelo de *benchmark* foram criados alguns modelos com base em trabalhos anteriores cujos objectivos eram similares (figuras 1 e 2). A escolha recaiu sobre o desenvolvimento de um novo modelo, pois este modelo permitiu revelar-se o mais adequado para alcançar os objectivos inicialmente propostos.

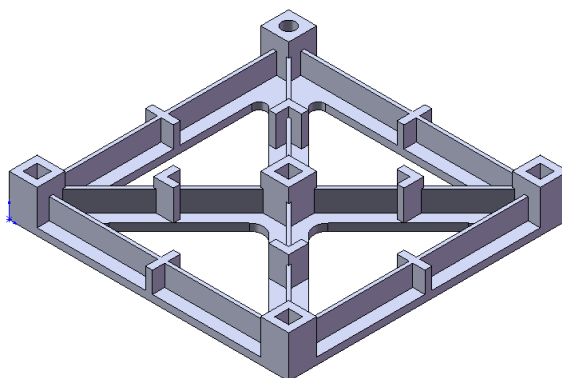


Figura 1 – Estudo 1 para um modelo de benchmark (Ippolito, *et al*, 1995).

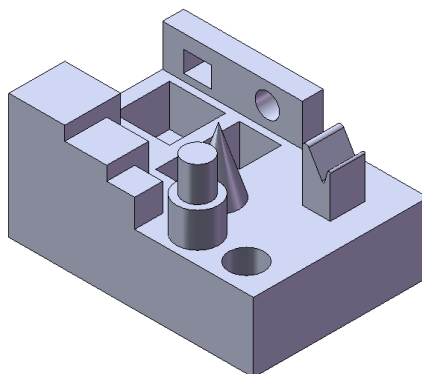


Figura 2 – Estudo 2 para um modelo de benchmark (Campanelli, *et al*, 2006).

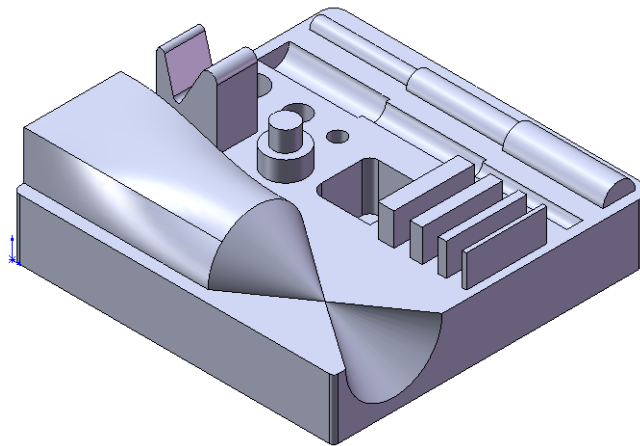


Figura 3 – Estudo 3 para um modelo de benchmark (modelo final).

O modelo de *benchmark* foi desenhado com recurso ao *software* de modelação 3D *SolidWorks® Office Premium 2007*. A escolha deste *software* em detrimento de outros deveu-se ao facto de ser um *software* comercial de uso corrente na indústria, e também pela maior familiaridade na utilização deste.

Em anexo (ANEXO I) encontra-se o desenho técnico do modelo de *benchmark* utilizado. Neste desenho encontram-se discriminadas todas as características geométricas e dimensionais usadas para comparação dos vários modelos.

3.1.1. Características do modelo (geométricas e dimensionais)

Definido o modelo de *benchmark* procedeu-se à discriminação de todas as características geométricas e dimensionais a serem inspeccionadas. Pretendeu-se verificar características como planeza, cilindridade, circularidade, conicidade, perpendicularidade, coaxilidade, paralelismo, localização e angularidade para atestar da qualidade geométrica dos modelos impressos. Conjuntamente também foi executado o controlo de algumas dimensões nos elementos de forma criados para verificação dos seus desvios dimensionais. No total foram previstas a verificação de 62 características entre elementos geométricos e dimensionais.

Com o mesmo modelo, pretendeu-se, também, averiguar da influência da direcção de impressão nas mesmas características já definidas. Após a selecção do ficheiro STL, em função da análise dos desvios, repetiram-se mais 2 impressões. Desta feita, os 2 modelos foram impressos em direcções de 45° e 90° em relação aos modelos anteriores. Assim, para a mesma resolução de STL, obtivemos 3 modelos idênticos mas segundo diferentes direcções de impressão.

No total foram necessários cinco protótipos, três com diferentes resoluções de STL, mais dois com direcção de impressão diferente do resultante da primeira escolha.

Como forma a complementar este trabalho, fez-se ainda a comparação do modelo resultante da escolha do “melhor” de entre a resolução do STL e direcção de impressão com o mesmo modelo mas obtido através de outras quatro tecnologias de prototipagem.

3.2. Tecnologias de Prototipagem Rápida Utilizadas

3.2.1. Impressão Tridimensional (TDP) (Processo Zprinter)

Ao contrário das outras tecnologias de prototipagem rápida, esta refere-se a um conjunto de equipamentos que usam a tecnologia de "jacto de tinta". No processo designado por ZPrinter (ZCorporation, USA), os protótipos são construídos sobre uma plataforma onde é colocada uma fina camada de material em pó, posteriormente uma cabeça de impressão faz a deposição selectiva de um ligante líquido que aglomera o pó nas áreas desejadas. O pó solto permanece na plataforma para dar suporte ao protótipo durante a fase de fabrico. A plataforma desce e torna-se a adicionar mais pó e o processo repete-se. No final a peça "verde" é limpa, removendo-se o pó excedente. Podem ser utilizados materiais poliméricos, cerâmicos, ceras e metálicos. Esta tecnologia tem tido recentemente um enorme desenvolvimento, atendendo à maior rapidez do processo, sendo bastante utilizada no fabrico de protótipos não funcionais, pois ainda apresenta algumas limitações de acabamento superficial e precisão comparativamente com os outros processos de PR (Relvas e Simões, 2007).

3.2.2. Sinterização Selectiva por Laser (SLS) (Selective Laser Sintering)

O processo de fabricação por Sinterização Selectiva por Laser, designado por SLS (Selective Laser Sintering) é um processo de fabrico de objectos por camadas, que recorre ao uso de um feixe de laser para fazer a sinterização de pós metálicos ou não metálicos para produzir modelos sólidos. Este processo funciona pelo princípio da sobreposição de camadas. O material de base do protótipo é fornecido em forma de um pó de pequeno tamanho de partícula. No início é depositada uma camada muito fina de pó sobre a área de trabalho que tem a forma de um recipiente. O laser CO₂ faz o varrimento da superfície fazendo a sinterização selectiva nas zonas em que incide, permanecendo as zonas envolventes sob a forma de pó solto, que vai servir como sustentação natural para a camada seguinte, não sendo necessária, nenhuma estrutura adicional de sustentação da peça durante o fabrico. O processo de sinterização usa a energia do feixe de laser para elevar a temperatura do pó para um ponto de fusão sem realmente derretê-lo. Após a sinterização de cada camada, a plataforma de trabalho desce e é depositada uma nova camada de pó que é transportada com o auxílio de um cilindro, dispersando-o sobre a superfície consolidada e sua envolvente, reiniciando-se o processo de sinterização selectiva de uma nova camada (Mesquita *et al.*, 1999; Relvas e Simões, 2007).

3.2.3. Maquinagem por Controlo Numérico Computorizado (CNC)

A maquinagem por CNC consiste na remoção de material, a partir de um bloco, até ser obtida a forma final. Esta tecnologia é ideal para a realização de protótipos sólidos, que podem ser obtidos em diversos tipos de materiais como plástico, alumínio ou aço (Alves *et al.*, 2001). As máquinas CNC são bastante utilizadas no fabrico de protótipos funcionais, ou nos casos em que as dimensões dos componentes tornam os custos dos outros métodos de prototipagem proibitivos.

As máquinas-ferramenta CNC permitem fabricar protótipos por maquinagem a partir de um bloco, cujo material pode ser idêntico ao do produto final. Neste processo, as peças geradas no sistema de CAD são transferidas para um software de CAM (Computer Aided Manufacturing). Com o auxílio deste são definidas as diversas fases de fabrico, como o desbaste do material excedente e o acabamento da superfície final, escolhidas as ferramentas de corte e geradas as respectivas trajectórias. Posteriormente, esta informação é processada sob a forma de um programa CN que inclui os dados tecnológicos (rotações, avanços, lubrificação, etc). Este programa é enviado para a máquina CNC que vai realizar de forma automática as operações de maquinagem do componente (Relvas e Simões, 2007).

3.2.4. Impressão Tridimensional por Extrusão de Plástico (FDM) (processo Dimension)

O processo FDM consiste na fabricação de protótipos num material termoplástico como o ABS, ou poliéster, ou elastómero ou em cera. A adição de material faz-se por camadas, formadas pela extrusão deste através de uma microfieira. Este processo está actualmente disponível na tecnologia de impressão tridimensional substituindo a tradicional alimentação de material em forma de fio e alimentado por uma bobine por um recipiente de material em pó que funde quando passa na cabeça extrusora que deposita o material em camadas muito finas e que vão solidificar sobre a camada anterior. Este sistema é mais rápido e menos dispendioso que a tecnologia tradicional de FDM (Relvas e Simões, 2007).

3.2.5. Estereolitografia (SLA) (processo Zprinter)

Este foi o processo pioneiro da PR, foi inventado por Charles Hull em 1984 e patentado em 1986 (Jacobs, 1992). O sistema é composto por quatro componentes principais: o computador, que permite gerar as camadas, o computador de controlo, o compartimento do processo e a unidade laser. A entrada da informação no computador faz-se geralmente através de um ficheiro que contém o modelo de triângulos (ficheiro STL) da peça gerada no CAD, a peça é seccionada em camadas finas conforme os parâmetros do processo. No início do processo o elevador está situado a uma distância da superfície do líquido igual à espessura da primeira camada. O raio laser percorre a superfície seguindo os contornos da secção da peça. A resina fotopolimerizável por acção do raio laser ultravioleta solidifica. Após a execução da primeira camada, o elevador move-se para baixo e o processo repete-se para a obtenção das camadas seguintes. O sistema de varrimento permite remover o excesso de material produzido em cada camada. Finalmente, a peça é retirada da tina e a sua polimerização é completada numa câmara de pós-cura de raios UV que irão aumentar a resistência mecânica da peça (Relvas e Simões, 2007)

3.3. Geração de ficheiros STL

Com o modelo digital foi possível gerar 3 ficheiros STL de diferente resolução e a partir destes fazer uma análise comparativa e uma inspeção geométrica e dimensional dos modelos obtidos por PR.

Deste modo, gerou-se um ficheiro de qualidade grosseira, um de qualidade fina e outro de qualidade superfina, assim designados para uma mais fácil distinção com base nos parâmetros de definição dos mesmos (tabela 1). A tabela 1 fornece a informação relevante para a distinção dos três modelos a serem obtidos por prototipagem rápida. Notou-se um claro aumento do número de triângulos necessários para a definição do modelo com a diminuição dos desvios máximos permitidos em relação ao modelo digital. Também se observou um aumento considerável no tamanho de ficheiro.

De notar que no ficheiro com resolução superfina, ocorreram erros durante a geração do ficheiro. Registaram-se 10 superfícies com erros/falhas. Estas falhas resultaram de sobreposição de superfícies identificadas pelo próprio software que as gerou. O mesmo software conseguiu resolver alguns destes erros após um diagnóstico de falhas. Quanto maior era a resolução do ficheiro mais erros ocorriam na geração do ficheiro STL.

Tabela 1 – Características dos ficheiros STL gerados

<i>Modelo de Estudo</i>	STL grosseiro (G)	STL fino (F)	STL superfino (SF)
Desvio linear máximo (mm)	0,1	0,05	0,01
Desvio angular máx. (grau)	30	10	5
Tempo geração (s)	≈1,51	≈1,67	≈2,33
Tempo abrir ficheiro STL (s)	7,32+10,55 *	14,86+24,34 **	51,08+110,07(+67,18) ***
Nº de triângulos	1.478	2.848	6.496
Tamanho do ficheiro (bytes)	417.543	804.731	1.835.648

* Tempo necessário para abrir o ficheiro e corrigir erros em faces (1 erro)

** Tempo necessário para abrir o ficheiro e corrigir erros em faces (6 erros)

*** Tempo necessário para abrir o ficheiro e corrigir erros em faces, neste ficheiro ocorreram 10 erros durante a geração do ficheiro, tendo o software conseguido corrigir 9 erros. O erro restante não se eliminou nas várias tentativas feitas.

No ambiente do software de modelação eram visíveis os desvios de forma em cada modelo. Cada ficheiro gerado resultou num modelo visualmente distinto, conforme apresentado nas figuras 4, 5 e 6.

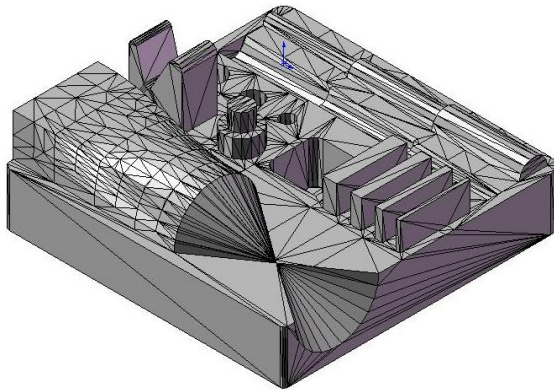


Figura 5 – Aspecto do modelo gerado com ficheiro STL grosseiro (G).

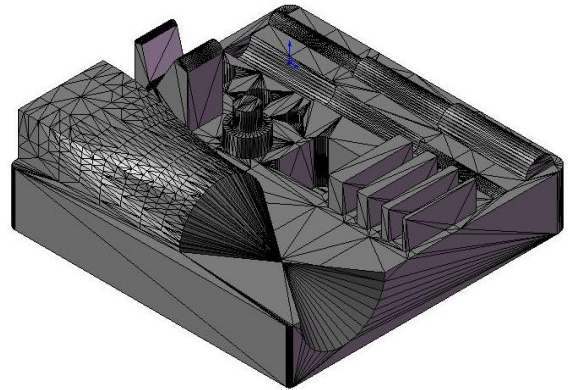


Figura 4 – Aspecto do modelo gerado com ficheiro STL fino (F).

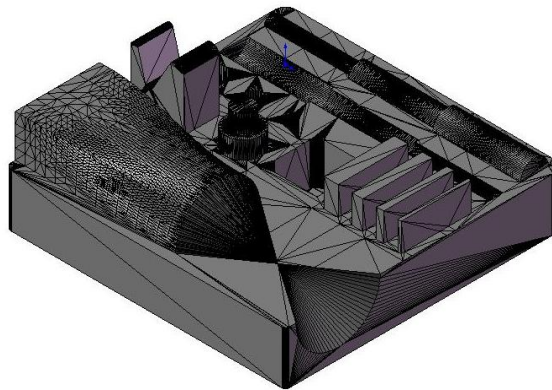


Figura 6 – Aspecto do modelo gerado com ficheiro STL superfino (SF).

Visualmente eram perceptíveis as diferenças, principalmente nos elementos com formas arredondadas. Esperava-se, então, que estas diferenças pudessem afectar os modelos físicos obtidos por PR e pudessem ser registadas através do recurso a inspecção realizada em máquinas de medição por coordenadas.

3.4. Obtenção dos Modelos Físicos de Estudo

3.4.1. Modelos de Impressão Tridimensional (TDP)

Os ficheiros STL depois de gerados foram exportados para o ambiente de trabalho de um equipamento de prototipagem rápida, neste caso utilizou-se a impressora 3D, instalada no Laboratório de Desenvolvimento de Produto do Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade de Aveiro (DEMUA), uma ZPrinter Z310 da ZCorporation cujo aspecto se reproduz na figura 7. O equipamento utiliza software específico para as operações de impressão que se revelou extremamente fácil de utilizar.

Este processo de PR usa um pó como material de construção e um ligante para agregação do mesmo. É um dos métodos mais económicos e rápidos para a obtenção de peças. É considerada uma tecnologia com precisão e resolução aceitáveis, o que a torna vantajosa na obtenção de protótipos de pequenas dimensões. Modelos mais recentes de impressoras 3D podem imprimir a cores bastando para isso colocar pó ou aglomerante colorido nos reservatórios. A impressão a cores torna-se útil pois podem-se diferenciar peças dentro de um conjunto, e a apresentação de um protótipo com as cores do produto final pode constituir uma mais-valia.



Figura 7 – Aspecto da impressora 3D utilizada, presente no DEMUA.

Os parâmetros de impressão definidos para os 3 primeiros modelos foram semelhantes. Mesma orientação de impressão (base da peça assente na horizontal) e mesma altura de camada. Os modelos obtidos a 45° (diagonal (D)) e 90° (vertical (V)) apresentaram parâmetros diferentes. Na tabela 2 é possível encontrar algumas das características dos modelos impressos. Parâmetros como: número de camadas, quantidade de ligante utilizado e tempo necessário para a impressão de cada modelo. De notar que a diferença de resolução no ficheiro STL não teve repercussões nestes parâmetros.

Tabela 2 – Parâmetros de impressão para os modelos obtidos por TDP.

	Modelo Físico				
	G	F	SF	V	D
Nº de camadas	315	315	315	788	703
Espessura camada (mm)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Quantidade ligante utilizado (ml)	50,9	50,9	50,9	76,9	70,8
Tempo de impressão (min)	55	55	55	124	116

Finalizado o processo de impressão procedeu-se à extracção e limpeza do modelo (figuras 8, 9 e 10). Esta etapa poderá influenciar os resultados esperados. Uma limpeza agressiva poderá retirar não só o material em excesso (situação desejada) mas também afectar as dimensões do modelo (situação indesejada). A sensibilidade do operador é determinante para minimizar este efeito.



Figura 8 – Processo de recolha do modelo físico (início).



Figura 9 – Processo de recolha do modelo físico (continuação).



Figura 10 – Etapa de limpeza do modelo físico.

Os modelos, após limpeza adequada, apresentavam uma qualidade visual aceitável e não eram facilmente perceptíveis diferenças entre os 3 modelos. Esperavam-se encontrar as diferenças através da tecnologia de inspeção.

3.4.2. Modelos Obtidos pelas Outras Tecnologias

No âmbito deste estudo foram ainda obtidos mais quatro modelos por recurso às tecnologias de SLS (Sinterização Selectiva por Laser), CNC, FDM e SLA. Estes modelos foram obtidos utilizando uma resolução de STL fina e impressos na horizontal (0°).

O modelo obtido por SLS (figura 11) foi construído em poliamida num equipamento SinterStation 2500 Plus, da 3DSystems, semelhante ao da figura 12.



Figura 12 – Equipamento SinterStation 2500 Plus, 3DSystems.

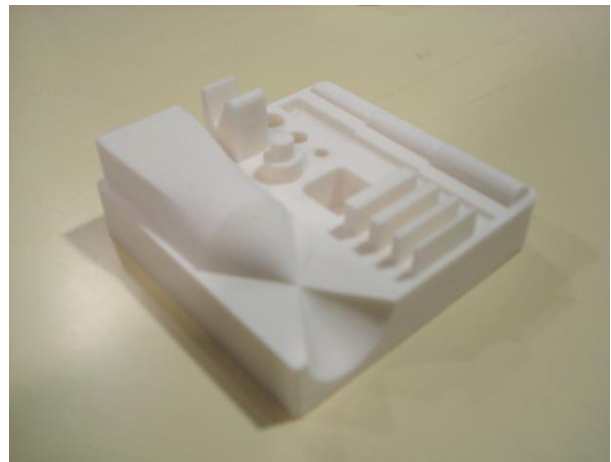


Figura 11 – Modelo obtido por SLS.

O modelo obtido por SLS apresentava aspecto físico muito semelhante ao modelo teórico, sendo, contudo, perceptíveis as camadas de construção.

O modelo obtido por CNC (figura 13) foi obtido através de equipamento idêntico ao da figura 14, uma fresadora Roland MDX 650 da Roland Corporation. O modelo foi construído em poliuretano de muito alta densidade (RenShape BM 5460 com densidade $0,7\text{g/cm}^3$)

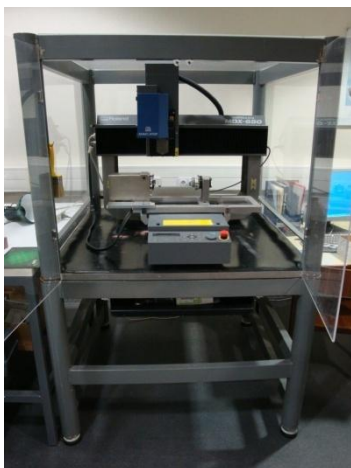


Figura 14 – Equipamento Fresadora Roland MDX650, Roland Corporation (DEMUA).



Figura 13 – Modelo obtido por CNC.

O modelo obtido por CNC é visualmente o mais próximo do modelo teórico, aparentemente reproduz todas as características fielmente.

O processo FDM, modelação por extrusão de plástico, usa ABS para obter o modelo da figura 15 através de um equipamento semelhante ao da figura 16. Este modelo era aquele que visualmente menos se assemelhava ao teórico, notando-se facilmente as camadas de construção. As superfícies irregulares mostravam claramente o efeito de construção tipo escada.



Figura 16 – Equipamento Dimension 1200es Series da 3D Printers.

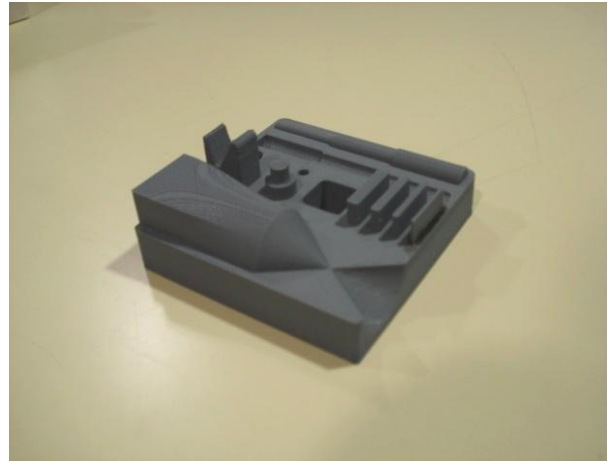


Figura 15 – Modelo obtido por FDM.

Falta referir que o modelo da figura 17 foi produzido por Estereolitografia, SLA, usando uma resina epóxida, num equipamento idêntico ao da figura 18. O modelo de aspecto transparente parecia reproduzir as características do modelo teórico. Notavam-se as camadas de construção provocadas pelo processo SLA.



Figura 18 – Equipamento Viper Si2 da 3DSYSTEMS.

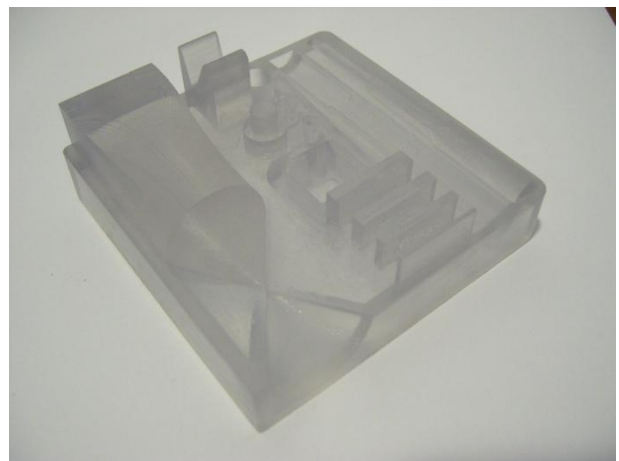


Figura 17 – Modelo obtido por SLA.

3.5. Inspeção e Controlo Geométrico e Dimensional

A comparação dos modelos obtidos por PR foi realizada com o auxílio de uma máquina de medição por coordenadas (CMM) (modelo MAXIM da ABERLINK, Innovative Metrology LLP, Gloucestershire, UK) (figura 20), em conjunto com o software de inspeção PowerINSPECT (Delcam, Birmingham, UK). Deste modo, foi possível analisar os desvios entre o modelo digital (dimensões teóricas) e o físico (dimensões reais).

Este procedimento iniciou-se com a importação do modelo digital para o ambiente de trabalho da ferramenta *PowerINSPECT*. A importação foi feita com recurso a um ficheiro normalizado e adequado a este tipo de aplicação (IGES). No *PowerINSPECT*, definiu-se, no modelo digital, as características que se pretendiam verificar nos modelos físicos. O software revelou-se fácil de utilizar após algumas etapas de aprendizagem do mesmo.

O processo de comparação iniciou-se com a fixação de cada um dos modelos físicos obtidos à mesa de trabalho da CMM. Este passo é importante de forma a garantir a correcta inspeção de um modelo físico. Esta “fixação” foi feita com o auxílio de plasticina, material este suficientemente eficaz para evitar o deslocamento do modelo durante a inspeção e garantir uma correcta leitura dos valores.

Para se proceder à comparação entre os 3 modelos físicos foi necessário fazer primeiro uma comparação entre o modelo digital e cada um dos modelos físicos. Com os resultados destas comparações foram criados 3 relatórios pelo software com a discriminação dos desvios entre modelo digital e os 3 modelos físicos. No final, foram comparados os 3 relatórios (um por modelo) para análise dos resultados finais. Com o intuito de diminuir a propagação de erros foram realizadas várias inspeções a cada modelo físico, com valores de temperatura e humidade semelhantes, optando-se no final pela utilização de apenas um relatório por cada modelo.

Na figura 19 ilustra-se um exemplo da inspecção realizada sobre uma superfície em que foram recolhidos 16 pontos para comparação com o modelo físico.

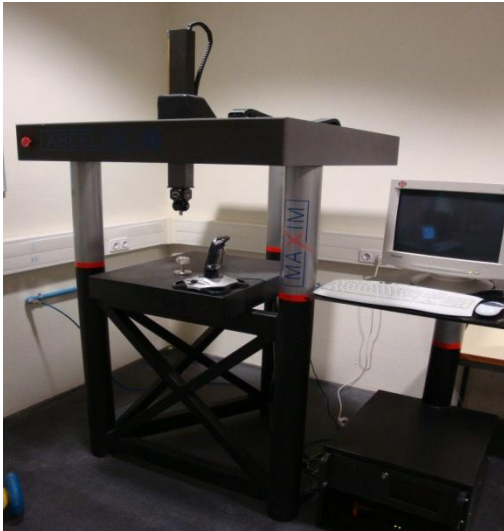


Figura 20 – Aspecto da CMM utilizada (DEMUA).

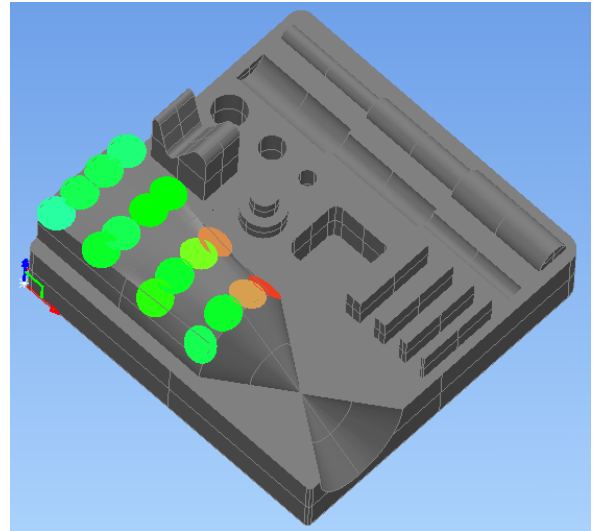


Figura 19 – Modelo digital no ambiente de trabalho PowerINSPECT.

A aplicação PowerINSPECT permitiu uma correcta comparação dos modelos em estudo. Este software permitiu criar um programa em modo de simulação sobre o modelo digital, de modo, a serem visíveis as trajectórias da ponta de prova da CMM. Esta simulação criada pelo software permitiu evitar potenciais colisões que pudessem ocorrer durante a recolha de pontos em modo automático sobre o modelo físico. Na figura 21 exemplifica-se uma colisão ocorrida durante a simulação do programa. Detectada a colisão bastou modificar alguns parâmetros na captação dos pontos, e assim garantir o correcto funcionamento do programa e a integridade da CMM.

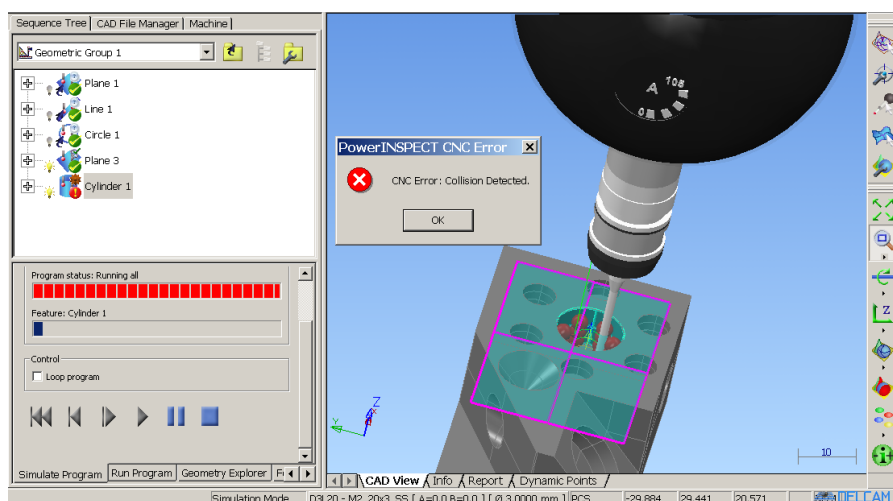


Figura 21 – Exemplo de ocorrência de um erro em modo de simulação.

4. Resultados obtidos:

Os 3 primeiros modelos físicos que foram inspeccionados distinguiam-se pelas diferentes resoluções de STL. Para cada modelo efectuaram-se pelo menos 3 inspecções. Estas realizaram-se em condições de pressão, temperatura e humidade semelhantes, num intervalo de tempo reduzido, para minimizar o efeito ambiente.

Por cada inspecção efectuada foi gerado um relatório contendo toda a informação relativa às características geométricas e dimensionais pretendidas.

Com a informação contida nos relatórios procedeu-se à comparação dos 3 modelos diferenciando a análise geométrica da dimensional. Os elementos que compõem o modelo de estudo foram inspeccionados tendo em conta o seu agrupamento em 4 categorias: dimensionais isolados (DI), dimensionais associados (DA), geométricos isolados (GI) e geométricos associados (GA).

Dentro dos considerados dimensionais isolados temos as dimensões de espessura de parede, raio de *fillets* e diâmetro de furos e de cilindros.

Nos dimensionais associados considerou-se os ângulos inspeccionados.

Para características geométricas isoladas foram consideradas a planeza, cilindricidade e conicidade.

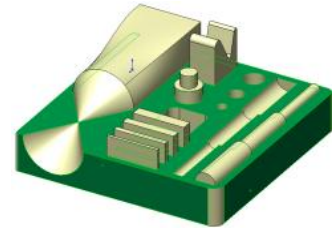
Na categoria restante, geométrica associada, englobaram-se a perpendicularidade, paralelismo, angularidade, localização e coaxilidade.

Todos os desvios foram inspeccionados segundo dois critérios de análise de toleranciamento (Norma ISO 2768 c L e Norma ISO 2768 m K). Nos elementos que não se enquadravam nesta referência, usou-se como referência o valor de 0,3mm de desvio em cada parede ("0,3/p"). O valor de 0,3mm foi considerado como a sobreespessura de material que a impressora 3D adiciona, por defeito, por parede. Isto teve como objectivo eliminar a influência do processo de construção do protótipo pela impressora.

4.1. Análise Geométrica

4.1.1. Elementos Geométricos Isolados

a) Planeza



Na análise dos modelos gerados com diferente resolução STL, verificou-se que os valores obtidos enquadraram-se, globalmente, numa tolerância fina. De realçar a análise do valor médio da planeza para cada modelo onde se verificou que o modelo gerado a partir da resolução fina de STL como o mais próximo do valor ideal, zero.

Tabela 3 – Valores de planeza, para diferentes resoluções de STL.

G/I	Planeza				ISO 2768 m K	ISO 2768 c L
		Modelo Físico				
	Elemento	G	F	SF		
	Plano A	0,087	0,017	0,100	0,1	0,2
	Plano B	0,056	0,036	0,063	0,1	0,2
	Plano C	0,058	0,073	0,042	0,1	0,2
	Plano D	0,031	0,042	0,009	0,1	0,2
	Plano E	0,030	0,074	0,560	0,2	0,4

Na análise da planeza esperavam-se valores muito próximos de zero, uma vez que na geração do ficheiro STL, o número de triângulos necessários para a definição de um plano é o mesmo, independentemente da resolução adoptada. Os valores de planeza foram relativamente baixos, apresentando diferenças entre os modelos físicos de baixa relevância.

Da análise da planeza aos modelos impressos a 45° (D) e 90° (V) (tabela 4) registou-se uma tendência no modelo impresso a 45° para os piores valores em quase todos os planos inspeccionados. Esta tendência poderá ser causada pela construção por camadas da tecnologia TDP. Uma qualquer face inclinada relativamente à direcção de impressão apresenta o aspecto de escada, o que poderá justificar os maus valores de

planeza. Como os planos inspeccionados para planeza se encontram a 45°, em resultado da direcção de impressão, poderá esta ter sido a causa para os piores valores.

Tabela 4 – Valores de planeza, para diferentes direcções de impressão.

G/I	Planeza			ISO 2768 m K	ISO 2768 c L	
		Modelo Físico				
	Elemento	H	V	D		
	Plano A	0,017	0,044	0,063	0,1	0,2
	Plano B	0,036	0,105	0,108	0,1	0,2
Plano C	0,073	0,048	0,040	0,1	0,2	
Plano D	0,042	0,011	0,111	0,1	0,2	
Plano E	0,074	0,133	0,324	0,2	0,4	

Na figura 22, exemplifica-se o efeito “escada”. Representado a verde tem-se a aresta pretendida e a vermelho a obtida por TDP.

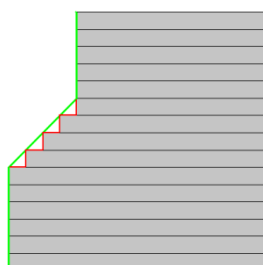


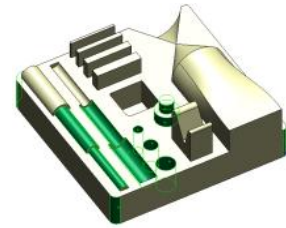
Figura 22 – Exemplificação do efeito “escada”.

Relativamente aos modelos obtidos por outras tecnologias (tabela 5), constatou-se que o modelo obtido por maquinagem CNC registou valores de planeza inferiores aos demais, sendo de longe o modelo com melhor valor médio. A tecnologia TDP, quando comparada com estas outras tecnologias, mostrou ser suficiente para ter todos os valores aceites pelo toleranciamento de classe fina (ISO 2768 m K), apesar do aspecto rugoso e visível em todos os modelos obtidos por TDP.

Tabela 5 - Valores de planeza, para diferentes tecnologias.

G\I	Planeza						ISO 2768 m K	ISO 2768 c L
		Modelo Físico						
	Elemento	TDP	SLS	CNC	FDM	SLA		
	Plano A	0,017	0,252	0,007	0,205	0,165		
	Plano B	0,036	0,021	0,002	0,022	0,103	0,1	0,2
	Plano C	0,073	0,038	0,006	0,015	0,033	0,1	0,2
	Plano D	0,042	0,020	0,005	0,081	0,073	0,1	0,2
	Plano E	0,074	0,025	0,007	0,113	0,144	0,2	0,4

b) Cilindricidade



Esperava-se encontrar na inspeção de cilindridade a maior diferença entre modelos resultantes das diferentes resoluções de STL (figuras 23 e 24). A obtenção dos ficheiros STL assim o previa. Na figura 23 é notória a diferença gerada pela resolução do ficheiro STL, no lado esquerdo da imagem temos o elemento gerado com STL superfino e do lado direito o mesmo elemento gerado com STL grosseiro. São necessários 72 triângulos para definir a superfície semi-cilíndrica no modelo de resolução superfina, enquanto no grosseiro a mesma superfície é definida com somente 16 planos triangulares.

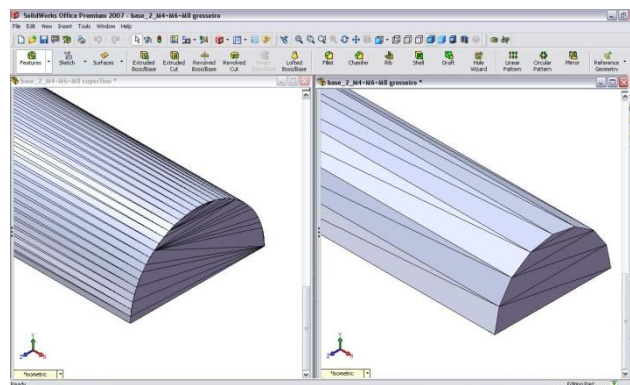


Figura 23 – Distinção visual de ficheiros STL (elemento cilíndrico).

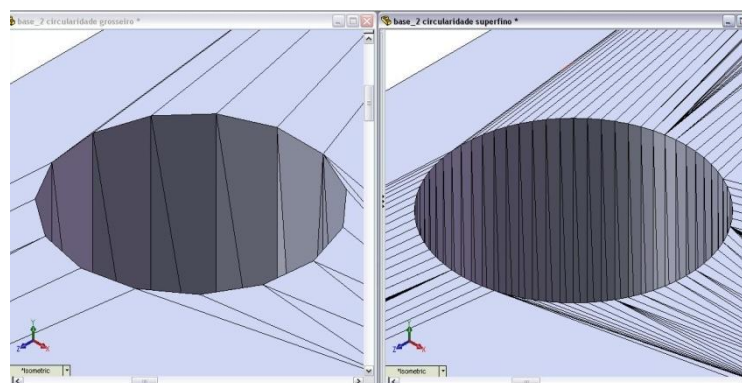


Figura 24 – Distinção visual de ficheiros STL (elemento cilíndrico “escavado”).

Contudo, os valores obtidos não corresponderam ao esperado. Também não se registou nenhuma tendência expectável de piores valores para o modelo grosseiro e

melhores para o modelo superfino. Ao invés, os valores registados não apresentaram qualquer tendência que permitisse retirar alguma conclusão.

Para os modelos com diferente resolução STL, observaram-se valores de cilindridade aceitáveis, na globalidade dos elementos, mas com melhor incidência nos elementos pertencentes ao modelo de resolução fina. A tabela 6 mostra isso mesmo, com destaque para o valor médio inferior aos demais.

Tabela 6 – Valores de cilindridade, para diferentes resoluções de STL.

G/I	Cilindricidade			ISO 2768 m K	ISO 2768 c L	
		Modelo Físico				
	Elemento	G	F			SF
	Cil HM4	0,071	0,071			0,084
Cil HM6	0,067	0,068	0,099	0,1	0,2	
Cil HF6	0,118	0,071	0,112	0,1	0,2	
Cil HF8	0,120	0,080	0,136	0,1	0,2	
Furo D4	0,201	0,136	0,077	0,1	0,2	
Furo D6	0,139	0,072	0,090	0,1	0,2	
Furo D8	0,145	0,074	0,082	0,1	0,2	
Cil VD6	0,092	0,132	0,157	0,05	0,1	
Cil VD10	0,095	0,101	0,087	0,05	0,1	
Fillet R2	0,063	0,089	0,040	0,1	0,2	
Fillet R3	0,042	0,038	0,033	0,1	0,2	
Fillet R4	0,034	0,064	0,074	0,1	0,2	

Da análise da cilindridade aos modelos impressos nas direcções a 45° e 90° (tabela 7), verificamos que o modelo obtido originalmente, a 0° (H), registou o melhor valor médio sendo aquele que apresentou maior número de valores dentro da tolerância fina. Destes 3 modelos, o modelo impresso a 90°, foi aquele que registou os piores valores.

Tabela 7 - Valores de cilindridade, para diferentes direcções de impressão.

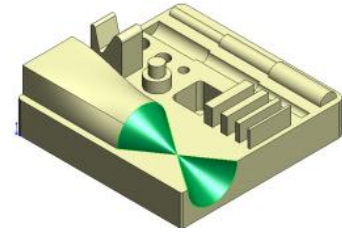
G/I	Cilindricidade				ISO 2768 m K	ISO 2768 c L
		Modelo Físico				
	Elemento	H	V	D		
	Cil HM4	0,071	0,066	0,093	0,1	0,2
	Cil HM6	0,068	0,083	0,102	0,1	0,2
	Cil HF6	0,071	0,120	0,149	0,1	0,2
	Cil HF8	0,080	0,273	0,215	0,1	0,2
	Furo D4	0,136	0,216	0,161	0,1	0,2
	Furo D6	0,072	0,261	0,232	0,1	0,2
	Furo D8	0,074	0,262	0,194	0,1	0,2
	Cil VD6	0,132	0,284	0,104	0,05	0,1
	Cil VD10	0,101	0,287	0,090	0,05	0,1
	Fillet R2	0,089	0,046	0,085	0,1	0,2
	Fillet R3	0,038	0,053	0,066	0,1	0,2
	Fillet R4	0,064	0,026	0,046	0,1	0,2

Na comparação com outras tecnologias (tabela 8), os valores de cilindridade mostraram o modelo obtido por CNC como o modelo físico mais próximo do teórico. Um valor médio bastante inferior ao das outras tecnologias, quase metade do 2º melhor valor médio, tecnologia FDM.

Tabela 8 - Valores de cilindridade, para diferentes tecnologias.

G/I	Cilindricidade						ISO 2768 m K	ISO 2768 c L
		Modelo Físico						
	Elemento	TDP	SLS	CNC	FDM	SLA		
	Cil HM4	0,071	0,221	0,004	0,027	0,032		
Cil HM6	0,068	0,065	0,019	0,024	0,031	0,1	0,2	
Cil HF6	0,071	0,138	0,027	0,032	0,096	0,1	0,2	
Cil HF8	0,080	0,209	0,009	0,021	0,062	0,1	0,2	
Furo D4	0,136	0,090	0,051	0,054	0,309	0,1	0,2	
Furo D6	0,072	0,131	0,031	0,070	0,315	0,1	0,2	
Furo D8	0,074	0,084	0,022	0,115	0,047	0,1	0,2	
Cil VD6	0,132	0,139	0,042	0,080	0,026	0,05	0,1	
Cil VD10	0,101	0,055	0,043	0,048	0,241	0,05	0,1	
Fillet R2	0,089	0,589	0,206	0,342	0,306	0,1	0,2	
Fillet R3	0,038	0,086	0,014	0,028	0,007	0,1	0,2	
Fillet R4	0,064	0,070	0,003	0,039	0,041	0,1	0,2	

c) Conicidade



Dos valores registados na tabela 9 constatou-se a falta de relação entre a resolução do STL e os valores dos resultados obtidos. Os valores de todos os modelos apresentaram-se dentro de uma tolerância de classe fina, o que poderá indiciar que a resolução não afecta a conicidade estabelecida nos elementos de forma.

O melhor valor verificou-se no modelo STL grosseiro.

Tabela 9 – Valores de conicidade, para diferentes resoluções.

G/I	Conicidade			ISO 2768 m K	ISO 2768 c L	
		Modelo Físico				
	Elemento	G	F			SF
	Cone F (35°)	0,037	0,035			0,059
	Cone M (35°)	0,031	0,058	0,070	0,2	0,5

Os valores de conicidade para os modelos impressos segundo direcções diferentes, também se inseriram totalmente no toleranciamento de classe fina, sendo o melhor valor médio obtido pelo modelo gerado a 90° (tabela 10). De notar de que o pior valor é registado para o modelo impresso a 0° mas, ainda assim, sem grande diferença para os restantes.

Tabela 10 – Valores de conicidade, para diferentes direcções de impressão.

G/I	Conicidade			ISO 2768 m K	ISO 2768 c L	
		Modelo Físico				
	Elemento	H	V			D
	Cone F (35°)	0,035	0,014			0,056
	Cone M (35°)	0,058	0,042	0,030	0,2	0,5

Relativamente aos valores de comparação das diferentes tecnologias (tabela 11), a tecnologia TDP foi a que registou os valores de conicidade mais elevados. Os melhores valores pertenceram à tecnologia CNC.

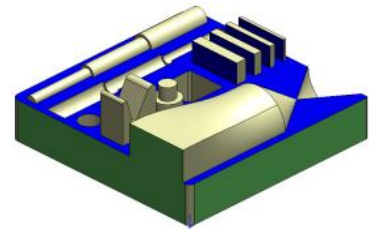
Todos os valores registados encontram-se bastante abaixo do toleranciamento de classe fina.

Tabela 11 - Valores de conicidade, para diferentes tecnologias.

G/I	Conicidade						ISO 2768 m K	ISO 2768 c L
		Modelo Físico						
	Elemento	TDP	SLS	CNC	FDM	SLA		
	Cone F (35°)	0,035	0,035	0,014	0,027	0,027	0,2	0,5
Cone M (35°)	0,058	0,013	0,014	0,007	0,024			

4.1.2. Elementos Geométricos Associados

a) Perpendicularidade



Todos os valores registados para esta característica apresentaram qualidade fina, pois foram globalmente baixos em todos os modelos.

Para as diferentes resoluções, os melhores valores foram obtidos pelo modelo STL fino, com o valor médio a distinguir-se dos outros dois (tabela 12). No entanto, não se evidenciou nenhuma tendência clara que mostrasse um comportamento previsível em função da resolução escolhida. Com valores tão abaixo da tolerância de classe fina, independentemente da resolução, parece ser pouco relevante a influência da resolução. Isto poderá dever-se ao facto de estarmos perante uma análise entre planos, ou seja, a resolução não afecta a geração do STL para elementos cujas superfícies sejam planas, e assim, torna-se indiferente a resolução adoptada.

Tabela 12 – Valores de perpendicularidade, para diferentes resoluções.

G/A	Perpendicularidade				ISO 2768 m K	ISO 2768 c L
		Modelo Físico				
	Elementos	G	F	SF		
	Planos A_B	0,172	0,197	0,284	0,4	0,6
	Planos A_E	0,022	0,030	0,044		
	Planos F_E	0,145	0,001	0,042		
	Planos N1E_E	0,037	0,091	0,074		
	Planos N2E_E	0,040	0,020	0,005		
	Planos N3E_E	0,080	0,007	0,087		
	Planos N4E_E	0,109	0,014	0,039		

Os valores de perpendicularidade, nos modelos impressos em direcções diferentes, encontram-se todos dentro do toleranciamento de classe fina. Não existem diferenças assinaláveis entre os modelos estudados.

Tabela 13 - Valores de perpendicularidade, para diferentes direcções.

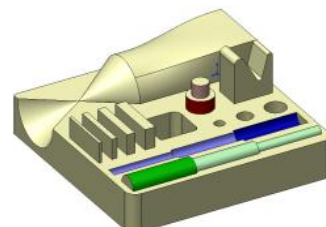
G/A	Perpendicularidade				ISO 2768 m K	ISO 2768 c L
		Modelo Físico				
	Elementos	H	V	D		
	Planos A_B	0,197	0,166	0,013		
	Planos A_E	0,030	0,032	0,082		
	Planos F_E	0,001	0,055	0,209		
	Planos N1E_E	0,091	0,002	0,018		
	Planos N2E_E	0,020	0,128	0,113		
	Planos N3E_E	0,007	0,064	0,099	0,4	0,6
	Planos N4E_E	0,014	0,186	0,015		

Nas diferentes tecnologias, destacaram-se de novo os melhores valores para o modelo obtido por CNC (tabela 14). A tecnologia CNC apresentou os melhores valores. De notar que estes consideravelmente inferiores aos de outras tecnologias. Por outro lado, a tecnologia SLA apresentou os piores valores, quase no limite do toleranciamento de classe fina.

Tabela 14 - Valores de perpendicularidade, para diferentes tecnologias.

G/A	Perpendicularidade						ISO 2768 m K	ISO 2768 c L
		Modelo Físico						
	Elementos	TDP	SLS	CNC	FDM	SLA		
	Planos A_B	0,197	0,058	0,028	0,129	0,320		
	Planos A_E	0,030	0,111	0,003	0,013	0,038		
	Planos F_E	0,001	0,025	0,020	0,061	0,244		
	Planos N1E_E	0,091	0,026	0,028	0,128	0,002		
	Planos N2E_E	0,020	0,027	0,007	0,001	0,345		
Planos N3E_E	0,007	0,031	0,028	0,005	0,384			
Planos N4E_E	0,014	0,011	0,021	0,007	0,280			

b) Coaxilidade



De todas as entidades verificadas, esta foi aquela que apresentou maior número de valores fora da tolerância, independentemente da resolução do STL, direcção de impressão ou tecnologia utilizada.

Dos 15 valores registados, 5 em cada modelo, para avaliar a influência da resolução do STL, apenas 3 se enquadram numa tolerância fina. Os valores médios para os 3 modelos foram superiores ao valor de referência. Contudo, foi o modelo STL fino que mais se aproximou dessa mesma referência (tabela 15). Este modelo enquadrou quase todos os valores numa tolerância de classe média (ISO 2768 c L).

Tabela 15 – Valores de coaxilidade, para diferentes resoluções.

G/A	Coaxilidade				ISO 2768 m K	ISO 2768 c L
		Modelo Físico				
	Elementos	G	F	SF		
	Cil F8_F6	0,202	0,195	0,233		
	Cil F8_F4	0,518	0,225	0,210		
	Cil M8_M6	0,189	0,201	0,456	0,2	0,3
	Cil M8_M4	0,510	0,527	0,751		
	Cil VD10_VD6	0,422	0,199	0,423		

Da análise da coaxilidade aos modelos impressos a 45° e 90° (tabela 16), observou-se que os melhores valores ficaram associados ao modelo impresso a 0°. Existindo alguns valores muito grosseiros nos modelos impressos a 45° e a 90°.

Tabela 16 - Valores de coaxilidade, para diferentes direcções.

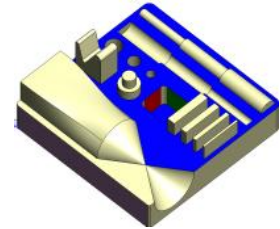
G/A	Coaxilidade				ISO 2768 m K	ISO 2768 c L
		Modelo Físico				
	Elementos	H	V	D		
	Cil F8_F6	0,195	0,083	0,396		
	Cil F8_F4	0,225	0,315	1,433		
	Cil M8_M6	0,201	0,198	0,624	0,2	0,3
	Cil M8_M4	0,527	0,212	1,533		
	Cil VD10_VD6	0,199	6,787	0,477		

Na tabela 17, pode-se observar a dificuldade em todos os processos (excepto maquinaria CNC) para obter valores abaixo de qualquer classe de toleranciamento. Todos os valores registados no modelo obtido por CNC apresentaram toleranciamento de classe fina, sendo mesmo a única tecnologia que o conseguiu fazer. O valor registado para a tecnologia SLA no elemento “Cil VD10_VD6” deveu-se a uma saliência no elemento que poderia ser aligeirada com o auxílio de ferramentas próprias mas para não influenciar as medições optou-se por não o fazer. Assim, o valor médio não tem validade para comparação com os outros.

Tabela 17 - Valores de coaxilidade, para diferentes tecnologias.

G/A	Coaxilidade						ISO 2768 m K	ISO 2768 c L
		Modelo Físico						
	Elementos	TDP	SLS	CNC	FDM	SLA		
	Cil F8_F6	0,195	0,259	0,052	0,172	0,231		
	Cil F8_F4	0,225	1,734	0,066	0,684	0,434		
	Cil M8_M6	0,201	0,375	0,055	0,293	0,631		
	Cil M8_M4	0,527	0,844	0,105	0,556	0,916	0,2	0,3
	Cil VD10_VD6	0,199	0,272	0,095	0,121	12,405		

c) Paralelismo



Todos os valores de paralelismo, de todos os modelos inspeccionados, foram registados dentro da tolerância de classe média (tabelas 18, 19 e 20).

Da análise à influência da resolução do ficheiro (tabela 18), verificou-se que os melhores valores foram obtidos no modelo de resolução STL fino. Sendo o único que enquadrou todos os valores no toleranciamento de classe fina. Também para esta característica, a influência da resolução do ficheiro STL parece não afectar de forma significativa a obtenção dos modelos.

Tabela 18 – Valores de paralelismo, para diferentes resoluções.

G/A	Paralelismo			ISO 2768 m K	ISO 2768 c L	
		Modelo Físico				
	Elementos	G	F			SF
	Planos A_C	0,034	0,075			0,127
	Planos O_E	0,152	0,054			0,063
	Planos L_M	0,460	0,077	0,215	0,2	0,5
	Planos I_J	0,076	0,079	0,190		

Na tabela 19, observou-se uma maior dificuldade em enquadrar os valores do modelo impresso a 90° num toleranciamento de classe fina.

Tabela 19 - Valores de paralelismo, para diferentes direcções.

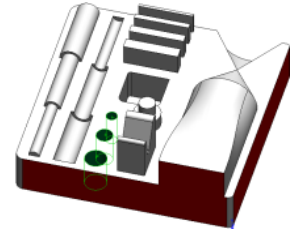
G/A	Paralelismo				ISO 2768 m K	ISO 2768 c L
		Modelo Físico				
	Elementos	H	V	D		
	Planos A_C	0,075	0,224	0,147		
	Planos O_E	0,054	0,145	0,096		
	Planos L_M	0,077	0,077	0,150	0,2	0,5
	Planos I_J	0,079	0,207	0,149		

Na tabela 20, estão registados os valores para as diferentes tecnologias utilizadas e pode-se observar que não existem diferenças significativas entre os valores registados para cada processo. A tecnologia SLA registou os valores mais elevados. A tecnologia por CNC demonstrou mais uma vez ser a que melhor respeita o modelo teórico. No total dos valores registados (20) entre as diferentes tecnologias, apenas se registou um valor fora do toleranciamento de classe fina, referente ao modelo obtido pelo processo SLA.

Tabela 20 - Valores de paralelismo, para diferentes tecnologias.

G/A	Paralelismo						ISO 2768 m K	ISO 2768 c L
		Modelo Físico						
	Elementos	TDP	SLS	CNC	FDM	SLA		
	Planos A_C	0,075	0,056	0,034	0,035	0,102		
	Planos O_E	0,054	0,030	0,021	0,048	0,043		
	Planos L_M	0,077	0,090	0,027	0,034	0,124	0,2	0,5
	Planos I_J	0,079	0,105	0,030	0,121	0,378		

d) Localização



Para esta característica analisou-se a posição de 3 furos no modelo de estudo. Cada furo tem um diâmetro diferente ($\varnothing 4$, $\varnothing 6$ e $\varnothing 8$) e na tabela 21 encontram-se as cotas nominais de posição para cada furo.

Tabela 21 – Indicação da posição de cada furo.

Elemento	Cota de posição	
	X	Y
Furo D4	29,0	52,0
Furo D6	19,0	52,0
Furo D8	7,0	52,0

Na análise dos modelos gerados com diferentes resoluções de STL, tabela 22, apenas os elementos inspeccionados no modelo de resolução fina apresenta todos os seus valores dentro da tolerância de classe fina. O valor médio mais baixo pertence ao modelo de resolução fina. Verificou-se também uma tendência clara em todos os modelos para encontrar os melhores valores nos furos de maior diâmetro.

Tabela 22 – Valores de localização, para diferentes resoluções.

G/A	Localização			ISO 2768 m K	ISO 2768 c L	
		Modelo Físico				
	Elemento	G	F			SF
	Furo D4	0,405	0,155			0,296
Furo D6	0,176	0,141	0,180	0,2	0,5	
Furo D8	0,126	0,078	0,180			

Na tabela 23 observa-se que a direcção de impressão de 0° foi a que melhor respeitou as cotas nominais dos furos do modelo. As outras direcções de impressão analisadas apenas enquadraram os seus desvios numa tolerância de classe média.

Tabela 23 - Valores de localização, para diferentes direcções.

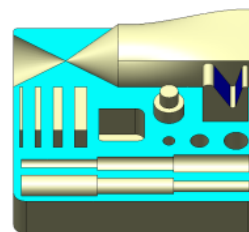
G/A	Localização			ISO 2768 m K	ISO 2768 c L	
		Modelo Físico				
	Elemento	H	V			D
	Furo D4	0,155	0,479			0,343
	Furo D6	0,141	0,286			0,355
	Furo D8	0,078	0,362	0,614	0,2	0,5

Na comparação das diferentes tecnologias (tabela 24), realce para os valores da tecnologia CNC que são os mais baixos em qualquer elemento analisado. Na tecnologia SLS, observou-se um desvio semelhante associado a cada furo inspeccionado independente do diâmetro. As tecnologias TDP, FDM e SLA apresentaram uma tendência para registarem melhores valores associados nos elementos de maior diâmetro. Os processos de TDP e CNC são os únicos cujos desvios se enquadram todos num toleranciamento de classe fina, enquanto os demais apresentaram todos os seus valores num toleranciamento de classe média.

Tabela 24 - Valores de localização, para diferentes tecnologias.

G/A	Localização					ISO 2768 m K	ISO 2768 c L	
		Modelo Físico						
	Elemento	TDP	SLS	CNC	FDM	SLA		
	Furo D4	0,155	0,431	0,007	0,306	0,322		
	Furo D6	0,141	0,413	0,035	0,199	0,278	0,2	0,5
	Furo D8	0,078	0,424	0,007	0,107	0,128		

e) Angularidade



A inspecção da característica de angularidade nos modelos com diferentes resoluções de STL (tabela 25) registou valores que não se enquadram em qualquer dos toleranciamentos usados como comparação. Ainda assim, o valor médio mais baixo verificou-se no modelo de resolução fina. Observou-se, também, uma tendência para o valor registado no elemento “Planos E_H” ser sempre inferior em qualquer modelo independentemente da resolução. O elemento “Planos E_H” é o resultado de uma inclinação de 75° entre plano E e o plano H, enquanto o elemento “Planos E_G” resulta de uma inclinação de 60° entre o mesmo plano E e o plano G.

Tabela 25 – Valores de angularidade, para diferentes resoluções.

G/A	Angularidade				ISO 2768 m K	ISO 2768 c L
		Modelo Físico				
	Elementos	G	F	SF		
	Planos E_G	2,829	1,548	2,175		
	Planos E_H	2,507	1,150	1,015		

Os modelos impressos a 45° e 90° apresentaram valores médios inferiores ao modelo impresso a 0° (tabela 26). Também nestes 2 modelos se verificou a tendência dos melhores valores estarem associados à inclinação de 75° e enquadrados na tolerância de classe fina.

Tabela 26 – Valores de angularidade, para diferentes direcções.

G/A	Angularidade			ISO 2768 m K	ISO 2768 c L	
		Modelo Físico				
	Elementos	H	V			D
	Planos E_G	1,548	1,196			1,740
	Planos E_H	1,150	0,215			0,358

Em relação aos modelos obtidos por outras tecnologias (tabela 27), apenas o processo FDM não manteve a tendência revelada anteriormente de associar os melhores valores à inclinação de 75°. Nesta comparação notou-se uma fraca qualidade do processo TDP quando comparado com os demais em questão. Também neste caso o processo CNC foi aquele que apresentou o melhor valor médio, sendo o único a enquadrar todos os seus valores no toleranciamento de classe fina.

Tabela 27 - Valores de angularidade, para diferentes tecnologias.

G/A	Angularidade						ISO 2768 m K	ISO 2768 c L
		Modelo Físico						
	Elementos	TDP	SLS	CNC	FDM	SLA		
	Planos E_G	1,548	0,544	0,183	0,251	0,629	0,5	1
	Planos E_H	1,150	0,090	0,132	0,869	0,598		

4.1.3. Análise Global das Características Geométricas

Tabela 28 – Análise global das características geométricas, para diferentes resoluções.

Geométricos Isolados (G/I)			
	G	F	SF
Nº Elementos verificados	19	19	19
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 m K	12	16	14
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 c L	18	17	18
Nº de Elementos fora de qualquer critério	1	2	1
Geométricos Associados (G/A)			
	G	F	SF
Nº Elementos verificados	21	21	21
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 m K	13	16	12
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 c L	16	18	16
Nº de Elementos fora de qualquer critério	5	3	5
Geométricos (Totais)			
	G	F	SF
Nº Elementos verificados	40	40	40
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 m K	25	32	26
Eficácia do processo (%)	62,5	80	65
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 c L	34	35	34
Eficácia do processo (%)	85	87,5	85
Nº de Elementos fora de qualquer critério	6	5	6

Através da tabela 28, observa-se que 80% dos valores associados à análise geométrica, registados no modelo com resolução fina de STL, se encontram dentro de uma tolerância fina. Já os outros modelos com resolução grosseira e superfina não ultrapassam os 65%.

Tabela 29 – Análise global das características geométricas, para diferentes direcções.

Geométricos Isolados (G/I)			
	H	V	D
Nº Elementos verificados	19	19	19
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 m K	16	11	8
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 c L	17	13	16
Nº de Elementos fora de qualquer critério	2	6	3
Geométricos Associados (G/A)			
	H	V	D
Nº Elementos verificados	21	21	21
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 m K	16	12	12
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 c L	18	18	14
Nº de Elementos fora de qualquer critério	3	3	7
Geométricos (Totais)			
	H	V	D
Nº Elementos verificados	40	40	40
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 m K	32	23	20
Eficácia do processo (%)	80	57,5	50
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 c L	35	31	30
Eficácia do processo (%)	87,5	77,5	75
Nº de Elementos fora de qualquer critério	5	9	10

A tabela 29 mostra uma maior facilidade do modelo impresso a 0° em reproduzir as características geométricas analisadas. De facto, com 80% dos valores registados dentro da tolerância fina, é comparativamente o melhor valor registado relativamente aos modelos impressos a 45° e 90° (50% e 57,5%, respectivamente).

Tabela 30 - Análise global das características geométricas, para diferentes tecnologias.

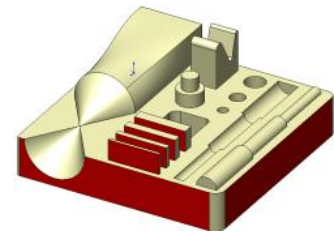
Geométricos Isolados (G/I)					
	TDP	SLS	CNC	FDM	SLA
Nº Elementos verificados	19	19	19	19	19
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 m K	16	11	18	15	13
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 c L	17	14	18	17	15
Nº de Elementos fora de qualquer critério	2	5	1	2	4
Geométricos Associados (G/A)					
	TDP	SLS	CNC	FDM	SLA
Nº Elementos verificados	21	21	21	21	21
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 m K	16	12	21	16	11
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 c L	18	18	21	19	17
Nº de Elementos fora de qualquer critério	3	3	0	2	4
Geométricos (Totais)					
	TDP	SLS	CNC	FDM	SLA
Nº Elementos verificados	40	40	40	40	40
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 m K	32	23	39	31	24
Eficácia do processo (%)	80	57,5	97,5	77,5	60
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 c L	35	32	39	36	32
Eficácia do processo (%)	87,5	80	97,5	90	80
Nº de Elementos fora de qualquer critério	5	8	1	4	8

Na tabela 30, pode-se observar o processo CNC como o processo com a maior percentagem de valores registados dentro de um toleranciamento fino. Dos 40 valores registados apenas um não ficou do toleranciamento definido. Comparativamente, o processo TDP enquadra um elevado número de valores dentro desse mesmo toleranciamento (87,5%).

4.2. Análise Dimensional

4.2.1. Dimensão Linear

a) Dimensão linear dos elementos paralelepípedicos



A tabela 31 regista os desvios nos modelos gerados com diferentes resoluções de STL. Os desvios enquadram-se, de modo geral, facilmente no critério “0,3/p”. Dos 18 valores registados nos 3 modelos, apenas 4 são inferiores a 0,4mm. Os valores apresentados não aparentam qualquer tendência que relacione a resolução do ficheiro STL com os desvios registados.

Tabela 31 – Valores das distâncias entre planos, para diferentes resoluções.

D/I	Distância entre planos (desvios em mm)				ISO 2768 m K	ISO 2768 c L	0,3/p
		Modelo Físico					
	Elementos	G	F	SF			
	AC (80)	0,482	0,440	0,566			
	BD (80)	0,056	-0,008	0,176	±0,3	±0,8	±0,6
	E4 (4)	0,483	0,416	0,603	±0,2	±0,3	±0,6
	E3 (3)	0,426	0,413	0,412	±0,1	±0,2	±0,6
	E2 (2)	0,478	0,470	0,506	±0,1	±0,2	±0,6
	E1 (1)	0,482	0,338	0,418	±0,1	±0,2	±0,6

Na tabela 32, podem-se observar os desvios registados nos modelos impressos segundo as três direcções de 0°, 45° e 90°. O melhor valor médio foi registado no modelo impresso a 0°. As outras direcções de impressão apresentaram desvios grosseiros mas não são significativos em relação aos valores apresentados pelo modelo impresso a 0°.

Tabela 32 – Valores das distâncias entre planos, para diferentes direcções.

D/I	Distância entre planos (desvios em mm)				ISO 2768 m K	ISO 2768 c L	0,3/p
		Modelo Físico					
	Elementos	H	V	D			
	AC (80)	0,440	0,631	0,634			
	BD (80)	-0,008	0,669	0,528	±0,3	±0,8	±0,6
	E4 (4)	0,416	0,407	0,501	±0,2	±0,3	±0,6
	E3 (3)	0,413	0,368	0,521	±0,1	±0,2	±0,6
	E2 (2)	0,470	0,321	0,631	±0,1	±0,2	±0,6
	E1 (1)	0,338	0,347	0,402	±0,1	±0,2	±0,6

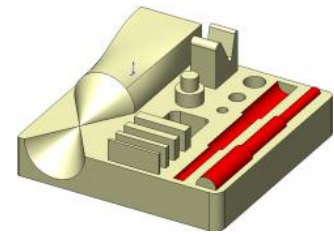
Da tabela 33 observa-se que o processo CNC foi aquele que reproduziu mais fielmente o modelo teórico apresentando desvios inferiores em quase todas as medições comparativamente aos outros processos.

Tabela 33 – Valores das distâncias entre planos, para diferentes tecnologias.

D/I	Distância entre planos (desvios em mm)						ISO 2768 m K	ISO 2768 c L	0,3/p
		Modelo Físico							
	Elementos	TDP	SLS	CNC	FDM	SLA			
	AC (80)	0,440	0,048	-0,027	-0,075	-0,017			
	BD (80)	-0,008	0,069	-0,011	-0,224	0,051	±0,3	±0,8	±0,6
	E4 (4)	0,416	0,006	-0,010	-0,064	0,273	±0,2	±0,3	±0,6
	E3 (3)	0,413	0,050	-0,008	-0,066	0,183	±0,1	±0,2	±0,6
	E2 (2)	0,470	0,045	0,003	-0,048	0,298	±0,1	±0,2	±0,6
	E1 (1)	0,338	0,061	0,001	-0,022	0,016	±0,1	±0,2	±0,6

4.2.2. Dimensão dos Elementos Cilíndricos

a) Cilindros horizontais



Nos modelos com resolução STL diferente, observou-se que os desvios registados para os semi-cilindros (meias-canais) em posição horizontal, quer os exteriores (meias-canais cilíndricas convexas) quer os interiores (meias-canais cilíndricas concavas), foram de um modo geral muito grosseiros, como se pode observar na tabela 34. Para a mesma dimensão, verificou-se que os desvios nos elementos interiores foram, na sua maioria, inferiores aos desvios registados nos elementos exteriores. O modelo com resolução STL fina registou o valor médio mais baixo nos desvios inspeccionados.

Tabela 34 – Valores dos desvios em cilindros horizontais, para diferentes resoluções.

D/I	Cilindros horizontais (desvios em diâmetro, mm)				ISO 2768 m K	ISO 2768 c L	0,3/p
		Modelo Físico					
	Elemento	G	F	SF			
	Cilind M4	0,794	0,675	1,042			
	Cilind M6	0,578	0,458	0,937	±0,1	±0,3	±0,6
	Cilind M8	0,276	0,458	0,652	±0,2	±0,5	±0,6
	Cilind F4	-0,211	-0,288	-0,598	±0,1	±0,3	±0,6
	Cilind F6	-0,214	-0,336	-0,536	±0,1	±0,3	±0,6
	Cilind F8	-0,625	-0,462	-0,593	±0,2	±0,5	±0,6

Na tabela 35, observa-se que também noutras direcções de impressão os desvios são altamente grosseiros. Dos 18 valores registados, nos 3 modelos, nenhum se enquadra no toleranciamento de classe fina.

Tabela 35 - Valores dos desvios em cilindros horizontais, para diferentes direcções.

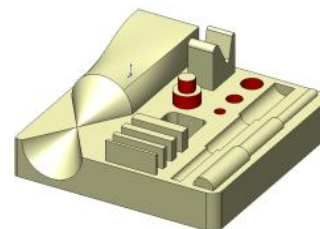
D/I	Cilindros horizontais (desvios em diâmetro, mm)				ISO 2768 m K	ISO 2768 c L	0,3/p
		Modelo Físico					
	Elemento	H	V	D			
	Cilind M4	0,675	0,494	0,548			
	Cilind M6	0,458	0,560	0,654	±0,1	±0,3	±0,6
	Cilind M8	0,458	0,744	0,700	±0,2	±0,5	±0,6
	Cilind F4	-0,288	-0,300	-0,246	±0,1	±0,3	±0,6
	Cilind F6	-0,336	-0,266	-0,474	±0,1	±0,3	±0,6
	Cilind F8	-0,462	-0,344	-0,791	±0,2	±0,5	±0,6

As diferentes tecnologias usadas em comparação com o processo TDP, apresentaram, globalmente, melhores resultados. Os valores registados foram de modo a serem toleranciados pelas normas ISO 2768 cL e, nalguns casos, pela norma ISO 2768 mK.

Tabela 36 - Valores dos desvios em cilindros horizontais, para diferentes tecnologias.

D/I	Cilindros horizontais (desvios em diâmetro, mm)						ISO 2768 m K	ISO 2768 c L	0,3/p			
		Modelo Físico										
	Elemento	TDP	SLS	CNC	FDM	SLA						
	Cilind M4	0,675	0,332	-0,192	-0,111	0,064				±0,1	±0,3	±0,6
	Cilind M6	0,458	0,076	-0,184	-0,171	0,207				±0,1	±0,3	±0,6
	Cilind M8	0,458	0,063	-0,103	-0,054	0,016				±0,2	±0,5	±0,6
	Cilind F4	-0,288	-0,007	0,053	0,058	0,017				±0,1	±0,3	±0,6
	Cilind F6	-0,336	0,003	0,063	0,062	0,087	±0,1	±0,3	±0,6			
	Cilind F8	-0,462	-0,150	0,135	0,123	0,193	±0,2	±0,5	±0,6			

b) Furos e cilindros verticais



A tabela 37 mostra os valores dos desvios obtidos para os furos de $\varnothing 4$, $\varnothing 6$ e $\varnothing 8$ e para os cilindros de $\varnothing 6$ e $\varnothing 10$ nos modelos com diferentes resoluções.

Registaram-se para quase todas as entidades inspeccionadas, desvios superiores a 0,4mm. Foram excepção os cilindros verticais no modelo de resolução grosseira de STL, que apresentaram valores muito ligeiramente abaixo de 0,4mm, “Cilind VD10” com 0,358mm e “Cilind VD6” com 0,386mm, e no modelo de resolução fina de STL o elemento “Cilind VD10” com 0,384mm. Os desvios dimensionais registados foram superiores nos elementos interiores (furos) comparativamente aos elementos exteriores (cilindros), provavelmente em consequência do método de limpeza dos modelos obtidos por TDP.

Tabela 37 - Valores dos desvios em furos e cilindros verticais, para diferentes resoluções.

D/I	Furos e Cilindros verticais (desvios em diâmetro, mm)				ISO 2768 m K	ISO 2768 c L	0,3/p
		Modelo Físico					
	Elemento	G	F	SF			
	Furo D4	-0,969	-0,664	-0,820			
Furo D6	-0,751	-0,495	-0,716	±0,1	±0,3	±0,6	
Furo D8	-0,751	-0,558	-0,696	±0,2	±0,5	±0,6	
Cilind VD10	0,358	0,384	0,561	±0,2	±0,5	±0,6	
Cilind VD6	0,386	0,423	0,601	±0,1	±0,3	±0,6	

Na tabela 38 observam-se os valores registados para os desvios associados aos modelos impressos segundo as direcções de 45° e 90°. De realçar que o modelo impresso a 0° obteve desvios inferiores aos outros modelos para qualquer entidade. Apesar disso, apenas a tolerância designada por “0,3/p” enquadrou-se de modo aceitável nestes valores.

Tabela 38 - Valores dos desvios em furos e cilindros verticais, para diferentes direcções.

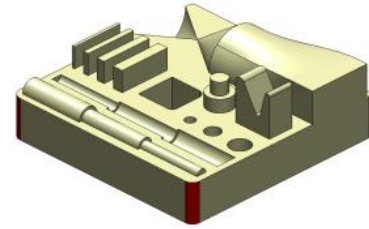
D/I	Furos e Cilindros verticais (desvios em diâmetro, mm)				ISO 2768 m K	ISO 2768 c L	0,3/p
	Modelo Físico						
	Elemento	H	V	D			
	Furo D4	-0,664	-0,694	-0,884			
	Furo D6	-0,495	-0,660	-0,929	±0,1	±0,3	±0,6
	Furo D8	-0,558	-0,732	-0,916	±0,1	±0,3	±0,6
	Furo D10	-0,558	-0,732	-0,916	±0,2	±0,5	±0,6
	Cilind VD10	0,384	0,420	0,477	±0,2	±0,5	±0,6
	Cilind VD6	0,423	-1,734	0,424	±0,1	±0,3	±0,6

A tabela 39 mostra os desvios associados às diferentes tecnologias. De notar que apenas os processos SLS e CNC enquadraram todos os seus valores numa tolerância fina. O processo FDM apresentou valores dentro de uma tolerância de classe média. Os restantes, TDP e SLA, registaram os maiores desvios, chegando a ultrapassar a tolerância, muito grosseira, adoptada para este estudo de “0,3/p”.

Tabela 39 - Valores dos desvios em furos e cilindros verticais, para diferentes tecnologias.

D/I	Furos e Cilindros verticais (desvios em diâmetro, mm)						ISO 2768 m K	ISO 2768 c L	0,3/p
		Modelo Físico							
	Elemento	TDP	SLS	CNC	FDM	SLA			
	Furo D4	-0,664	-0,003	-0,087	-0,055	-0,784			
	Furo D6	-0,495	-0,033	-0,062	-0,099	-0,696	±0,1	±0,3	±0,6
	Furo D8	-0,558	-0,002	-0,071	-0,040	-0,003	±0,2	±0,5	±0,6
	Cilind VD10	0,384	0,043	-0,098	-0,205	0,020	±0,2	±0,5	±0,6
	Cilind VD6	0,423	-0,015	-0,067	-0,174	-3,171	±0,1	±0,3	±0,6

c) Raios ("Fillets")



A tabela 40 regista os desvios associados aos modelos com diferentes resoluções de STL para as dimensões dos raios inspeccionados. Os valores registados para os "*fillets*" foram desconformes, pois não evidenciaram nenhuma tendência que permitisse relacionar o raio da entidade com a resolução do STL. Este facto poderá revelar alguma dificuldade no processo TDP em reproduzir este tipo de entidades com algum rigor.

Tabela 40 – Valores dos desvios em raios, para diferentes resoluções.

D/I	Fillets (desvios em raio, mm)			ISO 2768 m K	ISO 2768 c L	0,3/p	
		Modelo Físico					
	Elemento	G	F				SF
	Fillet R2	0,075	-0,051				-0,037
	Fillet R3	0,277	0,016	0,205	±0,2	±0,4	±0,3
	Fillet R4	-0,058	-0,314	-0,139	±0,2	±0,4	±0,3
					±0,5	±1	±0,3

A tabela 41 apresenta os desvios associados às impressões a 45° e 90° do modelo de estudo. Tanto o modelo impresso a 0° como o modelo impresso a 45°, registaram todos os seus desvios dentro da tolerância fina. O modelo impresso na diagonal apresentou os desvios mais baixos nesta comparação.

Tabela 41 – Valores dos desvios em raios, para diferentes direcções.

D/I	Fillets (desvios em raio, mm)				ISO 2768 m K	ISO 2768 c L	0,3/p
		Modelo Físico					
	Elemento	H	V	D			
	Fillet R2	-0,051	1,140	0,047			
	Fillet R3	0,016	0,555	0,081	±0,2	±0,4	±0,3
	Fillet R4	-0,314	-0,08	-0,069	±0,5	±1	±0,3

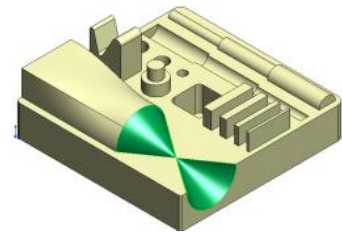
A análise aos desvios nos raios, “fillets”, nos modelos obtidos por diferentes processos pode ser feita através da tabela 42. O processo TDP foi o único que registou todos os valores dentro da tolerância de classe fina.

Tabela 42 – Valores dos desvios em raios, para diferentes tecnologias.

D/I	Fillets (desvios em raio, mm)						ISO 2768 m K	ISO 2768 c L	0,3/p
		Modelo Físico							
	Elemento	TDP	SLS	CNC	FDM	SLA			
	Fillet R2	-0,051	0,894	0,334	0,654	0,799			
	Fillet R3	0,016	0,197	0,152	-0,044	-0,042	±0,2	±0,4	±0,3
	Fillet R4	-0,314	-0,040	-0,090	0,000	0,007	±0,2	±0,4	±0,3
							±0,5	±1	±0,3

4.2.3. Dimensão de Ângulos

a) Ângulos dos elementos cónicos



Nos modelos com resoluções de STL diferentes (tabela 43), o modelo com resolução grosseiro foi o único a registar desvios angulares dentro de uma tolerância fina. Os outros modelos apresentaram, de modo mais notório no elemento “Cone F”, desvios bastante grosseiros.

Tabela 43 – Desvios angulares nos elementos cónicos, para diferentes resoluções.

D/A	Cones (desvio angular, grau)				ISO 2768 m K	ISO 2768 c L
		Modelo Físico				
	Elemento	G	F	SF		
	Cone F (35°)	0,262	1,116	1,294		
	Cone M (35°)	0,294	0,446	0,358		

Na análise conjunta dos modelos impressos a 45°, 90° e 0° (tabela 44) observou-se que o valor médio mais baixo foi registado no modelo impresso a 0°. De notar o facto deste modelo ser o único a apresentar desvios positivos. Este conjunto de valores não parece indicar qualquer tipo de comportamento que possa indiciar uma direcção de impressão como a mais favorável na reprodução destas características.

Tabela 44 – Desvios angulares nos elementos cónicos, para diferentes direcções.

D/A	Cones (desvio angular, grau)			ISO 2768 m K	ISO 2768 c L	
		Modelo Físico				
	Elemento	H	V			D
	Cone F (35°)	1,116	-1,453	-0,184		
	Cone M (35°)	0,446	-0,725	-1,313	±0,5	±1

A tabela 45 mostra as diferenças nos desvios registados nos diferentes processos de prototipagem. O processo CNC apresenta o valor médio mais baixo mas não é o único processo capaz de reproduzir estes elementos cónicos dentro de uma tolerância fina. Neste aspecto, apenas o processo TDP não o consegue fazer.

Tabela 45 – Desvios angulares nos elementos cónicos, para diferentes tecnologias.

D/A	Cones (desvio angular, grau)						ISO 2768 m K	ISO 2768 c L
		Modelo Físico						
	Elemento	TDP	SLS	CNC	FDM	SLA		
	Cone F (35°)	1,116	0,157	0,023	0,092	0,025	±0,5	±1
Cone M (35°)	0,446	0,126	0,025	0,229	-0,007			

4.2.4. Análise Global das Características Dimensionais

Tabela 46 – Análise global dos desvios dimensionais, para diferentes resoluções.

Dimensionais Isolados (D/I)	G	F	SF
Nº Elementos verificados	20	20	20
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 m K	3	4	3
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 c L	9	9	5
Elementos dentro da tolerância utilizando + 0,3 sobreespessura	15	18	12
Nº de Elementos fora de qualquer critério	5	2	8
Dimensionais Associados (D/A)	G	F	SF
Nº Elementos verificados	2	2	2
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 m K	2	1	1
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 c L	2	1	1
Nº de Elementos fora de qualquer critério	0	1	1
Dimensionais (Totais)	G	F	SF
Nº Elementos verificados	22	22	22
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 m K	5	5	4
Eficácia do processo (%)	22,7	22,7	18,2
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 c L	11	10	6
Eficácia do processo (%)	50,0	45,5	27,3
Elementos dentro da tolerância utilizando + 0,3 sobreespessura	15	18	12
Eficácia do processo (%)	68,2	81,8	54,5
Nº de Elementos fora de qualquer critério	7	4	10

Nesta análise global aos desvios dimensionais presentes nos modelos gerados com diferentes resoluções do ficheiro STL (tabela 46), observa-se que são poucos os desvios que se enquadram quer no toleranciamento de classe fina quer no de classe média. De facto, os desvios que se enquadram no toleranciamento de classe fina representam menos de 25% dos valores registados. Aplicando o critério designado de “ $0,3/p$ ” já se enquadram um maior número de desvios. O modelo de resolução fina, nesta categoria de tolerância, enquadra mais de 80% dos desvios registados, sendo o modelo que consegue agrupar maior número de desvios neste critério.

A tabela 47 resume os desvios dimensionais registados nos modelos impressos nas três direcções definidas inicialmente para este estudo.

Tabela 47 – Análise global dos desvios dimensionais, para diferentes direcções.

Dimensionais Isolados (D/I)			
	H	V	D
Nº Elementos verificados	20	20	20
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 m K	4	1	3
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 c L	9	7	7
Elementos dentro da tolerância utilizando + 0,3 sobreespessura	18	11	12
Nº de Elementos fora de qualquer critério	2	9	8
Dimensionais Associados (D/A)			
	H	V	D
Nº Elementos verificados	2	2	2
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 m K	1	0	1
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 c L	1	1	1
Nº de Elementos fora de qualquer critério	1	1	1
Dimensionais (Totais)			
	H	V	D
Nº Elementos verificados	22	22	22
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 m K	5	1	4
Eficácia do processo (%)	22,7	4,5	18,2
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 c L	10	8	8
Eficácia do processo (%)	45,5	36,4	36,4
Elementos dentro da tolerância utilizando + 0,3 sobreespessura	18	11	12
Eficácia do processo (%)	81,8	50,0	54,5
Nº de Elementos fora de qualquer critério	4	11	10

A análise da tabela 47 revela uma qualidade superior do modelo impresso a 0° para reproduzir a topologia do modelo teórico. Na comparação com os dois modelos impressos nas outras duas direcções, verificou-se essa superioridade em todos os toleranciamentos adoptados, sendo mais perceptível essa diferença no toleranciamento mais grosseiro usado neste estudo, onde os modelos impressos a 45° e 90° enquadraram apenas cerca de 50% dos seus desvios. Por outro, o modelo impresso a 0° apresenta mais de 80% dos seus desvios dentro deste mesmo toleranciamento.

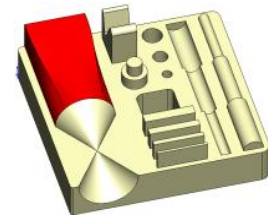
Na tabela seguinte, tabela 48, encontra-se a informação referente aos todos os desvios dimensionais registados nos modelos obtidos por diferentes processos de PR.

Tabela 48 – Análise global dos desvios dimensionais, para diferentes tecnologias.

Dimensionais Isolados (D/I)					
	TDP	SLS	CNC	FDM	SLA
Nº Elementos verificados	20	20	20	20	20
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 m K	4	18	17	15	12
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 c L	9	18	20	19	15
Elementos dentro da tolerância utilizando +0,3 sobreespessura	18	19	19	19	16
Nº de Elementos fora de qualquer critério	2	1	0	1	4
Dimensionais Associados (D/A)					
	TDP	SLS	CNC	FDM	SLA
Nº Elementos verificados	2	2	2	2	2
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 m K	1	2	2	1	2
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 c L	1	2	2	1	2
Nº de Elementos fora de qualquer critério	1	0	0	1	0
Dimensionais (Totais)					
	TDP	SLS	CNC	FDM	SLA
Nº Elementos verificados	22	22	22	22	22
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 m K	5	20	19	16	14
Eficácia do processo (%)	22,7	90,9	86,4	72,7	63,6
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 c L	10	20	22	20	17
Eficácia do processo (%)	45,5	90,9	100,0	90,9	77,3
Elementos dentro da tolerância utilizando +0,3 sobreespessura	18	19	19	19	16
Eficácia do processo (%)	81,8	86,4	86,4	86,4	72,7
Nº de Elementos fora de qualquer critério	4	2	0	2	5

Através dos valores registados na tabela 48, observa-se a dificuldade do processo TDP satisfazer os toleranciamentos mais finos comparativamente aos outros processos. Se no toleranciamento mais grosseiro as diferenças observadas entre processos foram pouco significativas, já no toleranciamento fino notou-se a maior facilidade dos outros processos, principalmente os processos SLS e CNC. De facto, o processo de prototipagem rápida CNC foi o único a apresentar todos os desvios registados dentro de uma tolerância.

4.2.5. Dimensão da Forma Complexa (*Freeform*)



Este elemento define-se por uma superfície de transição entre um arco perfeito (180°) e uma secção rectangular. Como método de controlo foram definidos 12 pontos distribuídos sobre a superfície e foi analisado o desvio absoluto registado em cada um dos pontos anteriormente definidos.

Para diferentes resoluções de STL (gráfico da figura 25), observam-se diferenças pouco significativas entre os três modelos. Os três modelos inspeccionados registaram valores absolutos inferiores a 0,350mm. Nota-se um comportamento semelhante nos desvios dos 3 modelos. Na tabela 49, pode observar que o desvio médio mais baixo encontra-se no modelo de resolução grosseira do STL, enquanto o valor mais elevado encontra-se no de resolução fina. Parece importante o facto do desvio-padrão (DesvPad) mais baixo deste conjunto de valores se encontrar no modelo de resolução fina. Tratando-se de uma superfície complexa, poderá ser mais importante o valor desta característica estatística para prever os desvios que possam advir da influência da resolução do ficheiro STL.

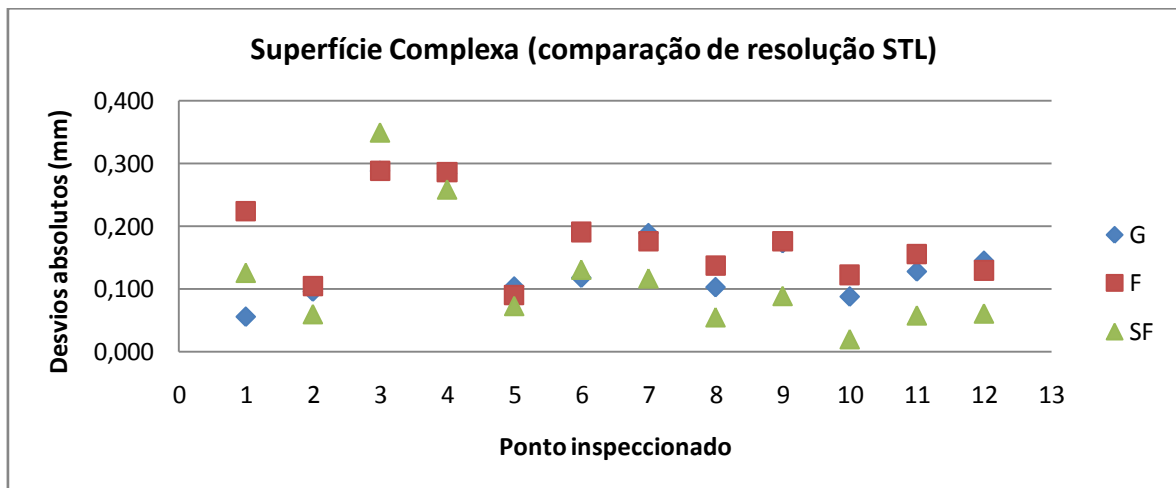


Figura 25 – Desvios na superfície complexa para diferentes resoluções.

Tabela 49 – Valores dos desvios no *Freeform*, para diferentes resoluções.

Superfície Complexa	Modelo		
	Pontos	G	F
Pt 1	0,056	0,224	0,126
Pt 2	0,096	0,105	0,060
Pt 3	0,288	0,288	0,350
Pt 4	0,284	0,286	0,259
Pt 5	0,104	0,091	0,073
Pt 6	0,118	0,191	0,131
Pt 7	0,189	0,176	0,117
Pt 8	0,103	0,138	0,055
Pt 9	0,173	0,176	0,089
Pt 10	0,088	0,123	0,020
Pt 11	0,128	0,156	0,058
Pt 12	0,145	0,130	0,061
Média	0,148	0,174	0,117
DesvPad	0,07412	0,06477	0,09562

Na comparação dos modelos impressos em diferentes direcções, observa-se, através do gráfico da figura 26, um comportamento homogéneo nos desvios registados no modelo impresso na vertical. No mesmo gráfico, observa-se facilmente que os maiores desvios absolutos encontram-se no modelo impresso a 45°. Através da tabela 50 constata-se, também, que o modelo impresso a 90° registou o valor médio e desvio-padrão mais baixo dos três modelos em análise.

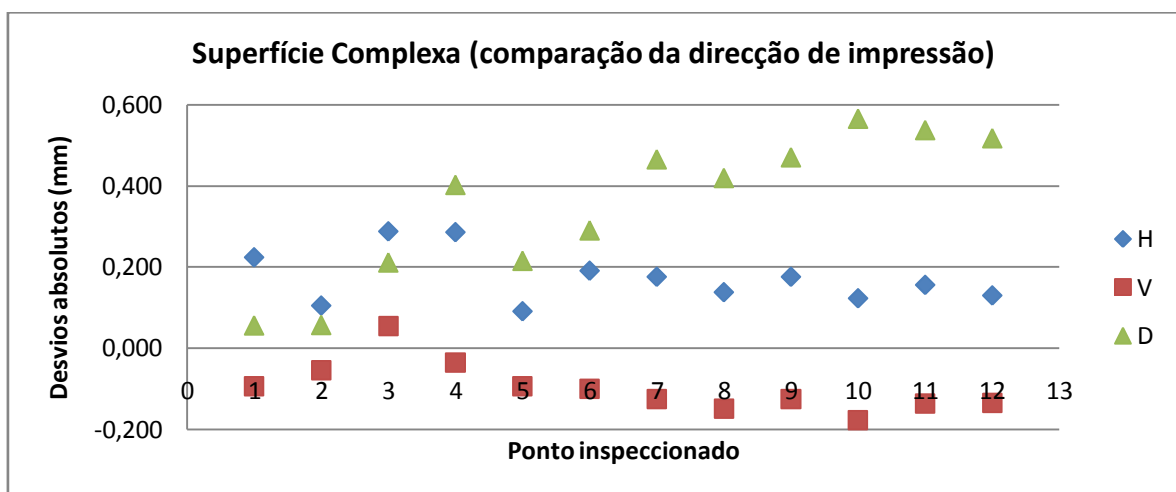


Figura 26 – Desvios na superfície complexa para diferentes direcções de impressão.

Tabela 50 – Valores dos desvios no *Freeform*, para diferentes direcções.

Superfície Complexa	Modelo		
	Pontos	H	V
Pt 1	0,224	-0,094	0,057
Pt 2	0,105	-0,055	0,058
Pt 3	0,288	0,055	0,212
Pt 4	0,286	-0,035	0,403
Pt 5	0,091	-0,094	0,216
Pt 6	0,191	-0,101	0,291
Pt 7	0,176	-0,126	0,466
Pt 8	0,138	-0,150	0,420
Pt 9	0,176	-0,126	0,471
Pt 10	0,123	-0,178	0,566
Pt 11	0,156	-0,137	0,538
Pt 12	0,130	-0,135	0,518
Média	0,174	-0,098	0,351
DesvPad	0,06477	0,06240	0,18030

Com a ajuda do gráfico da figura 27 e da tabela 51, observa-se que o modelo obtido pelo processo de maquinagem CNC é aquele que melhor reproduz a geometria analisada nesta secção. O valor mais baixo, tanto no desvio médio absoluto como no desvio-padrão, parecem confirma-lo.

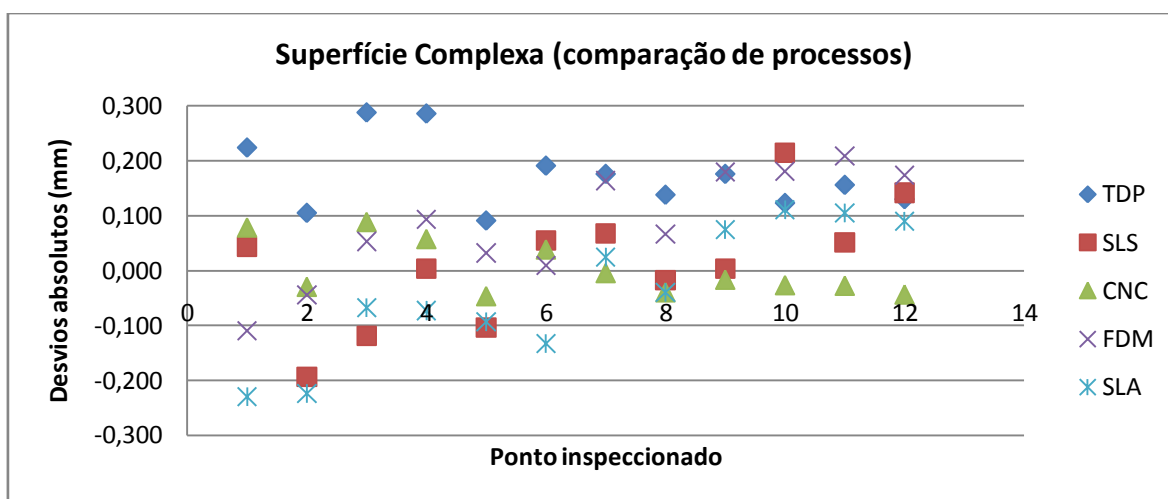


Figura 27 – Desvios na superfície complexa para diferentes processos.

Tabela 51 – Valores dos desvios no *Freeform*, para diferentes processos.

Superfície Complexa	Modelo				
	Pontos	TDP	SLS	CNC	FDM
Pt 1	0,224	0,043	0,079	-0,110	-0,230
Pt 2	0,105	-0,194	-0,029	-0,045	-0,224
Pt 3	0,288	-0,119	0,089	0,053	-0,068
Pt 4	0,286	0,003	0,058	0,093	-0,073
Pt 5	0,091	-0,104	-0,046	0,032	-0,093
Pt 6	0,191	0,055	0,039	0,009	-0,133
Pt 7	0,176	0,068	-0,004	0,164	0,025
Pt 8	0,138	-0,018	-0,039	0,066	-0,040
Pt 9	0,176	0,003	-0,016	0,180	0,075
Pt 10	0,123	0,215	-0,026	0,181	0,111
Pt 11	0,156	0,051	-0,027	0,209	0,105
Pt 12	0,130	0,142	-0,043	0,174	0,090
Média	0,174	0,012	0,003	0,084	-0,038
DesvPad	0,06477	0,11269	0,04950	0,10123	0,12114

4.3. Análise global das características geométricas e dimensionais

Nesta secção pretendeu-se efectuar uma análise conjunta das características geométricas e dimensionais dos elementos inspeccionados de modo a tornar mais fácil a interpretação dos dados tendo em conta os três parâmetros analisados neste trabalho.

- Estudo da influência da resolução do ficheiro STL,
- Estudo da influência da direcção de impressão ou geração das camadas,
- Estudo comparativo das diferentes tecnologias de prototipagem utilizadas na obtenção dos modelos físicos.

A primeira análise incide sobre a influência da resolução do ficheiro STL (tabela 52).

Tabela 52 – Análise global das características geométricas e dimensionais, para diferentes resoluções.

Total (Dimensionais + Geométricos)	G	F	SF
Nº Elementos verificados	62	62	62
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 m K	30	37	30
Eficácia do processo (%)	48,4	59,7	48,4
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 c L	45	45	40
Eficácia do processo (%)	72,6	72,6	64,5
Elementos dentro da tolerância utilizando +0,3 sobreespessura ISO 2768 m K	40	50	38
Eficácia do processo (%)	64,5	80,6	61,3
Elementos dentro da tolerância utilizando +0,3 sobreespessura ISO 2768 c L	49	53	46
Eficácia do processo (%)	79,0	85,5	74,2
Nº de Elementos fora de qualquer critério	13	9	16

Na tabela 52, observa-se que o modelo de resolução fina enquadró o maior número de características para todos os critérios de toleranciamento utilizados. Nas 62 características inspeccionadas apenas 9 apresentaram desvios não enquadrados em

nenhuma norma ou critério usado. O que representa menos de 15% dos valores. Onde a diferença se torna mais evidente é na análise em função do critério estabelecido em quando se descontou a sobreespessura de 0,3mm por parede no modelo (utilizando +0,3 sobreespessura – ISO 2768 m K), lembre-se que este critério foi definido em função das limitações tecnológicas registadas no equipamento e às quais acresciam a dificuldade em assegurar uma limpeza completa do modelo sem o danificar. Na conjugação de uma tolerância de classe fina com a sobreespessura de 0,3mm por parede, por excesso de material do processo TDP, conseguiu-se captar mais de 80% dos valores dentro da tolerância por comparação com os 60% obtidos para as resoluções grosseira e superfina do ficheiro STL.

A análise seguinte diz respeito à direcção de impressão dos modelos de estudo. Observa-se, na tabela 53, que o modelo impresso a 0° apresenta o maior número de elementos válidos para todos os critérios de análise de tolerância estabelecidos. De realçar a diferença percentual entre os 3 modelos. No critério de toleranciamento, ISO 2768 m K, mais sobreespessura de 0,3mm (critério 3), os 2 modelos impressos nas direcções de 45° e 90°, registaram cerca de menos 20% de elementos dentro da tolerância quando comparados com o modelo impresso a 0°.

Tabela 53 – Análise global das características geométricas e dimensionais, para diferentes direcções.

Total (Dimensionais + Geométricos)	H	V	D
Nº Elementos verificados	62	62	62
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 m K	37	24	24
Eficácia do processo (%)	59,7	38,7	38,7
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 c L	45	39	38
Eficácia do processo (%)	72,6	62,9	61,3
Elementos dentro da tolerância utilizando +0,3 sobreespessura ISO 2768 m K	50	34	32
Eficácia do processo (%)	80,6	54,8	51,6
Elementos dentro da tolerância utilizando +0,3 sobreespessura ISO 2768 c L	53	42	42
Eficácia do processo (%)	85,5	67,7	67,7
Nº de Elementos fora de qualquer critério	9	20	20

Por último, a análise que comparou os vários processos de prototipagem utilizados na obtenção dos modelos físicos (tabela 54), permitiu verificar que o processo de maquinação por CNC apresentou em todos os critérios utilizados, mais de 90% dos elementos geométricos e dimensionais dentro das tolerâncias estabelecidas.

Tabela 54 – Análise global das características geométricas e dimensionais, para diferentes tecnologias.

Total (Dimensionais + Geométricos)	TDP	SLS	CNC	FDM	SLA
Nº Elementos verificados	62	62	62	62	62
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 m K	37	43	58	47	38
Eficácia do processo (%)	59,7	69,4	93,5	75,8	61,3
Elementos dentro da tolerância ISO 2768 c L	45	52	61	56	49
Eficácia do processo (%)	72,6	83,9	98,4	90,3	79,0
Nº de Elementos fora de qualquer critério	9	10	1	6	13

Recorrendo à tabela 54, observa-se que o processo CNC registou cerca de 94% dos elementos inspeccionados dentro do toleranciamento mais apertado estabelecido para este estudo. O que representa quase 20% mais em relação ao processo FDM, que apresentou o 2º melhor valor percentual nesta comparação. Importa referir que dentro deste mesmo toleranciamento o processo TDP mostrou ser o menos capaz de reproduzir as geometrias do modelo de estudo, com menos de 60% dos elementos dentro da tolerância. Nas tolerâncias menos rígidas a diferença entre o processo de maquinação por CNC e os demais é evidente.

5. Conclusões

Para a realização deste estudo foram produzidos três modelos por prototipagem rápida, recorrendo à tecnologia de TDP (ZPrinter) com diferentes resoluções de STL, superfina, fina e grosseira. Todos estes modelos foram obtidos por adição das camadas segundo uma orientação horizontal (impressão a 0°). Posteriormente e depois de uma avaliação muito sumária dos resultados foram produzidos mais dois modelos por TDP, agora com uma orientação de camadas a 45° e 90°. Finalmente, foram realizados mais quatro modelos recorrendo a algumas das tecnologias de prototipagem directa mais habitualmente utilizadas na actualidade, SLS, CNC, FDM e SLA. Todos os modelos foram inspeccionados recorrendo a uma máquina de medição por coordenadas tendo para tal sido controladas 22 dimensões e 40 elementos geométricos num total de 62 características topológicas, e, ainda, uma superfície de transição entre um arco perfeito e uma secção rectangular onde foram inspeccionados 12 pontos nessa mesma superfície.

Considerando os objectivos iniciais era expectável obter resultados que permitissem a definição dos parâmetros necessários para gerar um ficheiro STL que fosse capaz de reproduzir um modelo CAD 3D com uma tolerância previamente conhecida, objectivo esse que se revelou uma tarefa de alguma dificuldade. No entanto, no final deste trabalho pode-se afirmar que existem características, geométricas e dimensionais, cujos desvios são fáceis de prever em termos quantitativos e qualitativos.

No início deste trabalho esperava-se registar os maiores desvios no modelo de resolução grosseira de STL (menor número de faces triangulares, maior desvio linear e maior desvio angular) e, que o modelo de resolução superfina fosse o que apresentasse menores desvios. Esta suposição não se verificou. Em diversas análises foi, inclusivamente, o modelo de resolução do STL superfina a registar os maiores desvios face ao modelo teórico.

Dos resultados experimentais obtidos, tornou-se evidente que o ficheiro de resolução fina do STL apresentou globalmente melhores resultados, registando um maior número de elementos geométricos e dimensionais dentro dos limites de tolerância

estabelecidos. Apresentou desvios inferiores em quase todas as características verificadas e menor desvio-padrão em quase todos os valores registados.

Dimensionalmente os três modelos apresentaram desvios grosseiros.

Após uma análise mais cuidada ao processo da ZPrinter utilizado para obter os modelos por TDP, verificou-se a existência de uma sobreespessura aproximadamente constante de cerca de 0,3 mm nas superfícies dos modelos. A origem para este desvio generalizado pode ser justificado por: aumento do efeito de capilaridade do líquido infiltrante, devido ao elevado nível de humidade que o pó aparentava ter. A segunda justificação pode ser encontrada na fraca limpeza das superfícies do modelo, esta opção foi deliberada com o objectivo de evitar que uma limpeza mais agressiva pudesse afectar de forma diferente os vários modelos, e deste modo implicar variações dimensionais não directamente provenientes do processo de impressão.

Este facto (sobreespessura de 0,3 mm), tornou óbvio a adopção de um critério que permitisse contornar este desvio genérico, mas mantivesse a possibilidade de análise comparativa entre os diversos modelos.

Neste contexto, no primeiro estudo (análise da resolução do STL), e em termos da análise geométrica, esta não foi afectada pela sobreespessura de 0,3 mm pelo que os três modelos obtiveram bons resultados em termos de planeza, paralelismo, perpendicularidade e localização, onde no total dos 19 elementos controlados em cada modelo todos ficaram dentro do critério de tolerância “ISO2768 m k”, excepto do furo de $\varnothing 4$ mm, na resolução grosseira que apresentou um desvio de localização de 0,405 mm. Da análise de resultados de cilindridade e coaxialidade pode-se concluir que as resoluções mais finas tendem a apresentar desvios menores e que estes desvios também diminuem nos elementos de maiores diâmetros.

Analisando estes mesmos parâmetros comparativamente nos modelos obtidos com impressão a 45° e 90°, concluiu-se que existe uma ligeira degradação da qualidade do paralelismo apresentado pelo modelo a 90°, acentuada na análise da localização também para o modelo a 45°. Pode-se também concluir que a cilindridade melhora ligeiramente no modelo a 90°, mas este mesmo modelo não consegue registar num valor de coaxialidade dentro de qualquer critério de tolerância. Pelo que face aos valores

registados poder-se-ia concluir que o modelo impresso a 0° é o mais equilibrado em termos de cilindridade e coaxialidade.

A análise da conicidade permitiu concluir que esta não é uma característica problemática nesta tecnologia, pois todos os valores registados ficaram dentro da tolerância. Ao invés na análise da angularidade esta tecnologia não conseguiu obter nenhum valor dentro da tolerância para qualquer resolução de STL, a excepção foi entre os planos E e H nos modelos impressos a 45° e 90°.

Da análise dimensional pode-se concluir pela evidência da existência de uma sobreespessura (cerca de 0,3 mm e já justificada anteriormente) em todos os modelos obtidos através da tecnologia de TDP. Depois de filtrada esta sobreespessura podemos concluir que globalmente foi o modelo com uma resolução fina de STL e impresso a 0° (horizontalmente) aquele que apresentou desvios menores. Adicionalmente, pode-se referir que o aumento da resolução na geração do ficheiro de STL para além do valor por defeito (desvio linear máximo 0,05mm e desvio angular máximo 10°) não aumenta a precisão dimensional do modelo físico. O modelo de resolução de STL superfino (desvio linear máximo 0,01mm e desvio angular máximo 5°) apresentou apenas um melhor registo no total das 22 dimensões controladas. Em relação à orientação de impressão refira-se que a impressão a 0° registou 14 menores desvios, a impressão a 90°, 6 valores e a impressão a 45°, 2 valores, o que indica que a orientação a 0° é tendencialmente a melhor. Esta conclusão é reforçada pela análise da superfície complexa. Apesar do desvio médio ser superior aos modelos de resolução grosseira e superfina de STL, o desvio-padrão, mais baixo, mostra um comportamento mais fácil de prever neste tipo de superfícies. Também em relação à orientação de impressão o desvio-padrão mostra a mesma tendência, do modelo de resolução fina, obtendo um valor muito próximo ao melhor valor registado nesta análise, no modelo impresso na vertical.

O estudo comparativo entre as diferentes tecnologias de prototipagem directa permitiu concluir que o modelo obtido por CNC, no total dos 40 elementos geométricos controlados, registou 34 menores desvios, e apesar de apresentar valores dentro da tolerância não obteve os menores desvios em 5 análises de perpendicularidade e um no raio de concordância de 2mm (perfeitamente justificáveis pelo processo de corte, flexão e desgaste da ponta da ferramenta de corte e que eventualmente possam afectar a

superfície obtida). Entre as tecnologias de prototipagem rápida verificou-se que a tecnologia de FDM registou 22 menores desvios, TDP 11 menores desvios e SLS 7 menores desvios geométricos. Estes valores podem ter justificação não só no processo mas também no comportamento do material do modelo. O modelo FDM foi obtido em ABS o que lhe permite uma melhor estabilidade dimensional e geométrica comparativamente ao modelo de SLS que foi obtido em poliamida.

Na análise dimensional, entre as diferentes tecnologias, verificou-se que apesar da tecnologia CNC apresentar 21 elementos dentro da tolerância (raio de concordância de 2mm fora de tolerância), esta tecnologia só apresentou 3 melhores registos (para a distância entre faces de 1, 2 e 3 mm). A tecnologia de SLS registou 10 menores desvios, a tecnologia de SLA, 8 menores desvios, a tecnologia TDP, 3 e tecnologia FDM a registar apenas um menor desvio. Na superfície complexa, registou-se comportamento semelhante, a tecnologia CNC mostrou ser a mais homogénea nos desvios registados e no desvio-padrão dos mesmos. Também os processos SLS e SLA registaram valores muito satisfatórios no valor do desvio médio. O processo TDP registou o 2º menor valor no desvio-padrão. Estes valores foram expectáveis de acordo com a literatura e permitem concluir que as tecnologias que utilizam o laser na geração das camadas do modelo (SLS e SLA) são tendencialmente mais precisas dimensionalmente. A disparidade de resultados entre o controlo geométrico e o controlo dimensional pode ser justificado pelo comportamento dos materiais dos modelos ao longo do tempo.

Como conclusão final pode-se referir que com este trabalho foi recolhida informação relevante para uma avaliação mais precisa das exigências de resolução na geração do ficheiro de STL, qual a orientação de impressão que presumivelmente permitirá obter melhores resultados em função da topologia da peça ou modelo e finalmente o que é expectável em termos geométricos e dimensionais quando se realiza um modelo numa determinada tecnologia de prototipagem directa. Globalmente a tecnologia CNC foi a mais fiável mas envolve um maior domínio de conhecimentos do processo e pode requerer recursos adicionais (ferramenta CAM, máquinas e ferramentas capazes de reproduzir detalhes finos). Em contra-posição estiveram as tecnologias de TDP (ZPrinter e Dimension) de custos operacionais mais acessíveis mas que apresentaram uma grande variabilidade de resultados em função da topologia da superfície sua complexidade, detalhe e extensão da mesma.

6. Referencias Bibliográficas

Apontamentos de Projecto e Produção Assistidos por Computador, Simões J., 2002

Siodmok, P., CAD overview. 2008 [15/10/08]; disponível em: <http://www.designcouncil.org.uk/>.

Foggiato, J.A., Volpato, N e Bontorin, A. C. B., Recomendações para modelação em sistemas CAD-3D, in 4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. 2007: Brasil.

Nidiffer, K.E.a.D., D. (2005) Evolving Distributed Project Management. Focus: Project management.

Jacobs, P.F., Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography. 1990: Society of Manufacturing Engineers.

Minetto, C.F., Um estudo sobre curvas NURBS 2003, Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Rio Grande do Sul.

Wah, W.H., Introduction to STL format. 1999.

Pal, P. (2001) An easy rapid prototyping technique with point cloud data. Rapid Prototyping Journal Volume 7.

STL format files work for machining too, in Modern Machine Shop. 1996.

Simões, J.e.C., F., Projecto PROTOMA. 2004.

Generation of an STL File from 3D Measurement Data with User-Controlled Data Reduction, Y. H. Chen, C. T. Ng and Y. Z. Wang, The international Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1999

Yao, A.W.L. (2005) Applications of 3D scanning and reverse engineering techniques for quality control of quick response products.

R. Ippolito, L. Iuliano, Politecnico di Torino; A. Gatto, Università di Ancona (Italy), Benchmarking of Rapid Prototyping Techniques in Terms of Dimensional Accuracy and Surface Finish (1995).

S.L. Campanelli, G. Cardano, R. Giannoccaro, A.D. Ludovico, E.L.J. Bohez, Statistical analysis of the stereolithographic process to improve the accuracy (2006)

Relvas, C. e Simões, J. A. (2007), Apontamentos de Tecnologia de Prototipagem, disciplinas de Concepção e Fabrico Assistidos por Computador e Projecto (2º ano MIEM) e Produção Assistidos por Computador (3º ano licenciatura em EGI), Universidade de Aveiro.

Ulrich, K. T.; Eppinger, S. D. (2000, 2ª ed), Product Design and Development, McGraw-Hill Higher Education

Otto, K.; Wood, K. (2001), Product Design - Techniques in Reverse Engineering and New Product Development, Prentice Hall

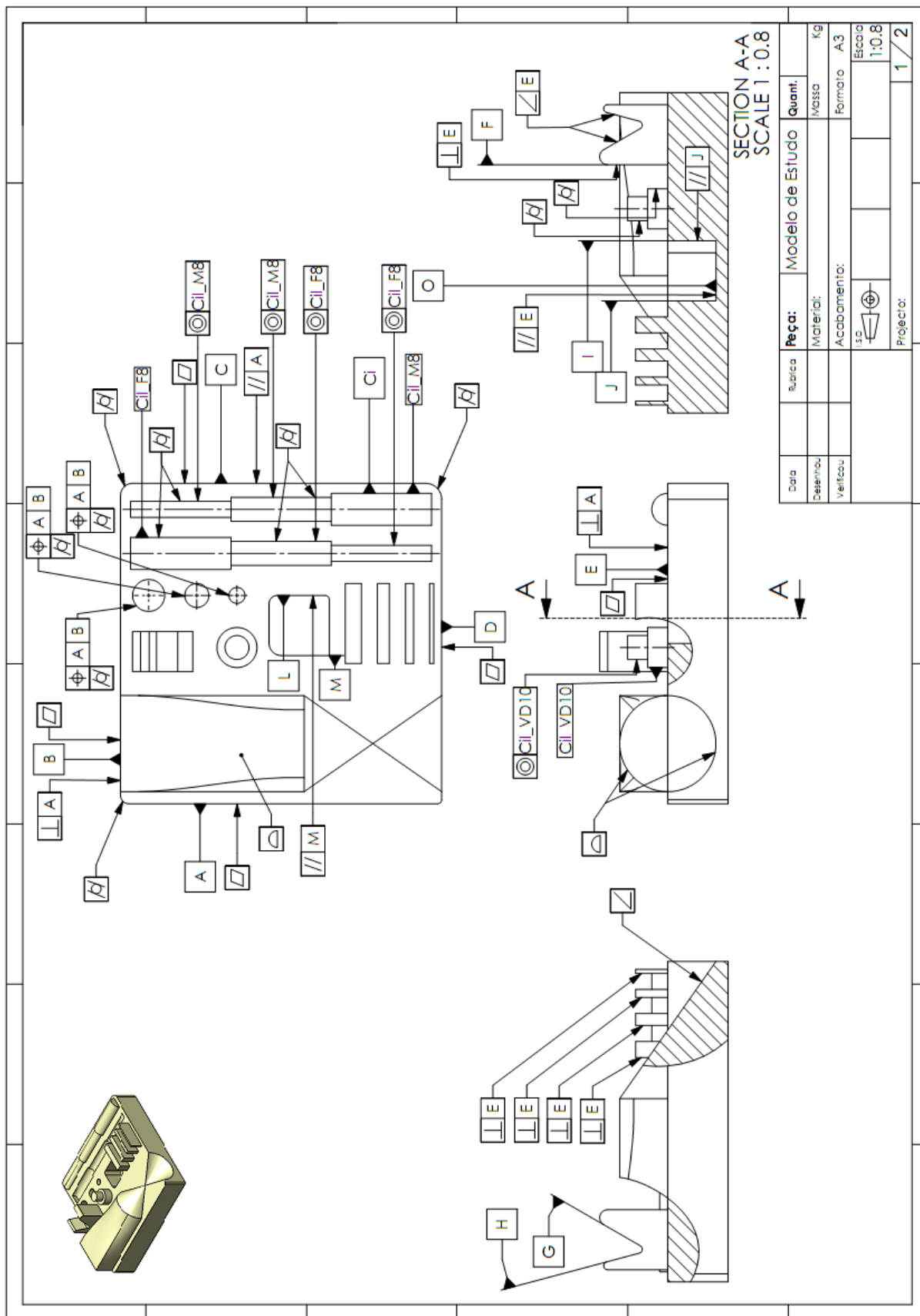
Alves, F. J. L.; Braga, F. J. S.; Simão, M. S.; Neto, R. J. L. (2001). Prototipagem Rápida. (Protoclick).

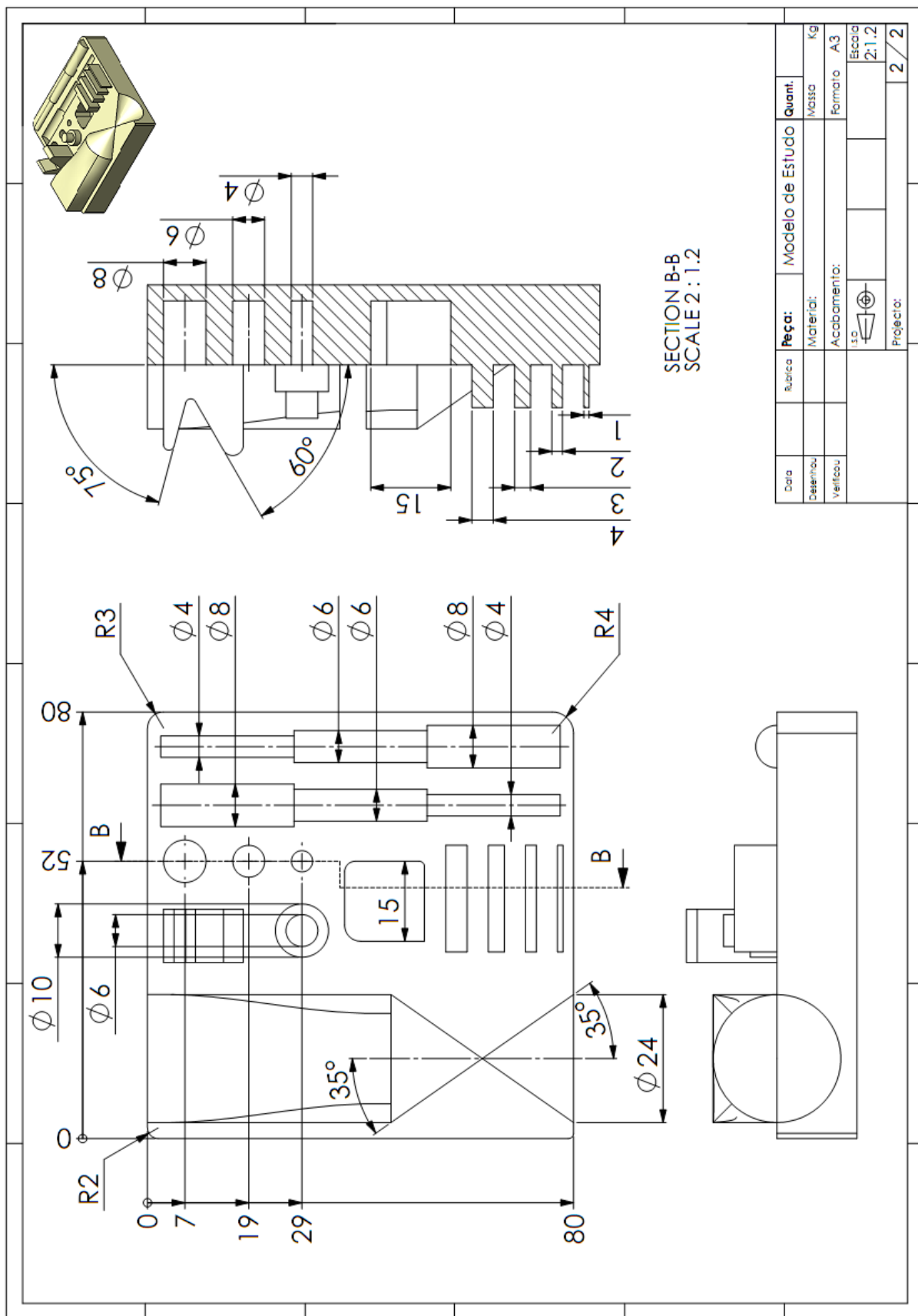
Mesquita, R.; Simões, F. C.; Casimiro, R. S.; Janz, G. B. (1999). a) Tecnologias de prototipagem rápida na indústria de componentes automóvel nacional: estudo do estado da arte. (ITEC, Centro de Tecnologias Avançadas de Produção).

Mesquita, R.; Simões, F.; Cruz, F. (1999). b) Tecnologias Avançadas de produção na indústria de moldes e ferramentas: um estudo do estado da arte. (ITEC, Centro de Tecnologias Avançadas de Produção).

Dumas, A. (2002), Theory and Practice of Industrial Design, disponível em <http://www.aeportugal.pt/Areas/Inovacao/IMTs-manual/industrialdesign.pdf>.

Anexos





Data	Peça:	Modelo de Estudo	Quant.
Desenho	Material:	Massa	Kg
Verificou	Acabamento:	Formado	A3
	Is	Isola	2:1.2
	Projeto:		2 / 2